



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01F 1/84 (2020.01)

(21)(22) Заявка: 2018119511, 25.10.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.10.2016

Дата регистрации:
26.02.2020

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
29.10.2015 US 14/927,080

(43) Дата публикации заявки: 02.12.2019 Бюл. № 34

(45) Опубликовано: 26.02.2020 Бюл. № 6

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 29.05.2018

(86) Заявка РСТ:
US 2016/058635 (25.10.2016)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2017/074924 (04.05.2017)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б.Спасская, 25, строение 3,
ООО "Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

ГЕНРИ, Манус, П. (GB)

(73) Патентообладатель(и):

ШНЕЙДЕР ЭЛЕКТРИК СИСТЕМЗ
ЮЭсЭй, ИНК. (US)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 5555190 A1, 10.09.1996. US
6272438 B1, 07.08.2001. US 5115683 A1,
26.05.1992. US 9395236 B2, 19.07.2016.

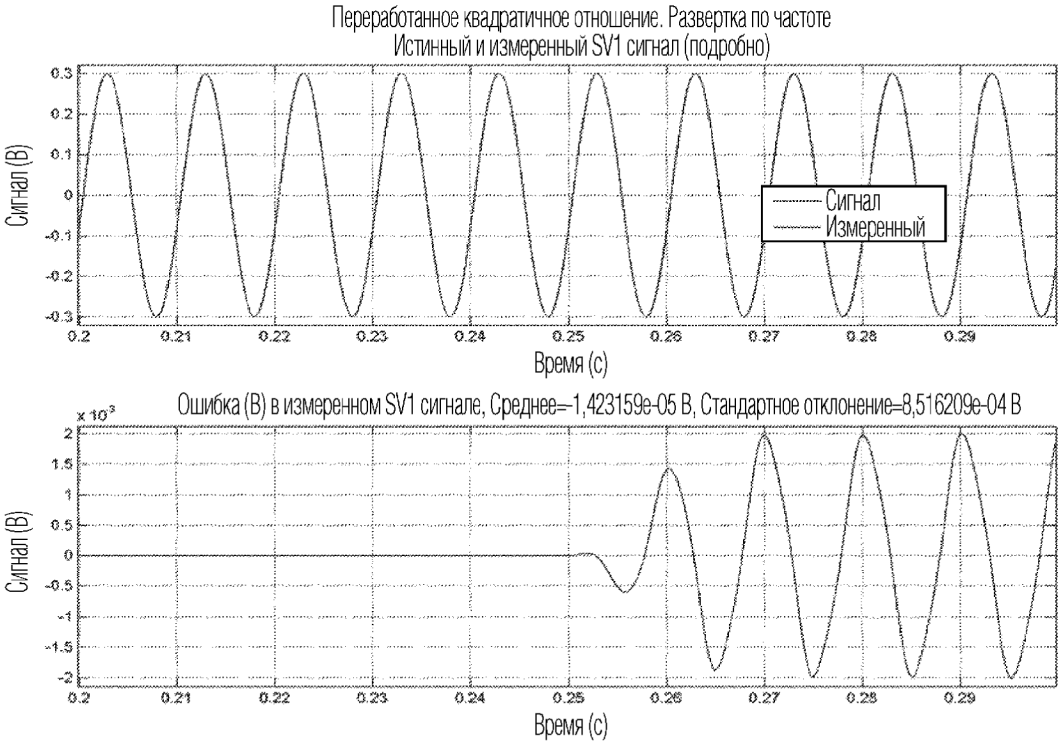
(54) РАСХОДОМЕР КОРИОЛИСА

(57) Реферат:

Изобретение в целом относится к расходомерам, в частности к расходомерам Кориолиса. Расходомер Кориолиса имеет возбудитель, который вызывает колебания трубки, первый датчик, выполненный с возможностью генерирования первого сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки в первом местоположении, и второй датчик, выполненный с возможностью генерирования второго сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки во втором местоположении. Первое и второе местоположения расположены

таким образом, что сдвиг фаз между первым и вторым сигналами, когда трубка колеблется возбудителем, связан с массовым расходом текучей среды через расходомер. Цифровой сигнальный процессор включает в себя множество детекторов, настроенных на множество различных частот. Детекторы выполнены с возможностью параллельного анализа первого сигнала датчика и формирования выходного сигнала, характеризующего насколько точно фактическая частота первого сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен

соответствующий детектор. Технический результат – повышение точности. 3 н. и 26 з.п. ф-



ФИГ. 16



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01F 1/84 (2020.01)

(21)(22) Application: **2018119511, 25.10.2016**

(24) Effective date for property rights:
25.10.2016

Registration date:
26.02.2020

Priority:

(30) Convention priority:
29.10.2015 US 14/927,080

(43) Application published: **02.12.2019 Bull. № 34**

(45) Date of publication: **26.02.2020 Bull. № 6**

(85) Commencement of national phase: **29.05.2018**

(86) PCT application:
US 2016/058635 (25.10.2016)

(87) PCT publication:
WO 2017/074924 (04.05.2017)

Mail address:
**129090, Moskva, ul. B.Spasskaya, 25, stroenie 3,
OOO "Yuridicheskaya firma Gorodisskij i
Partnery"**

(72) Inventor(s):

HENRY, Manus, P. (GB)

(73) Proprietor(s):

Schneider Electric Systems USA, Inc. (US)

(54) **CORIOLIS FLOW METER**

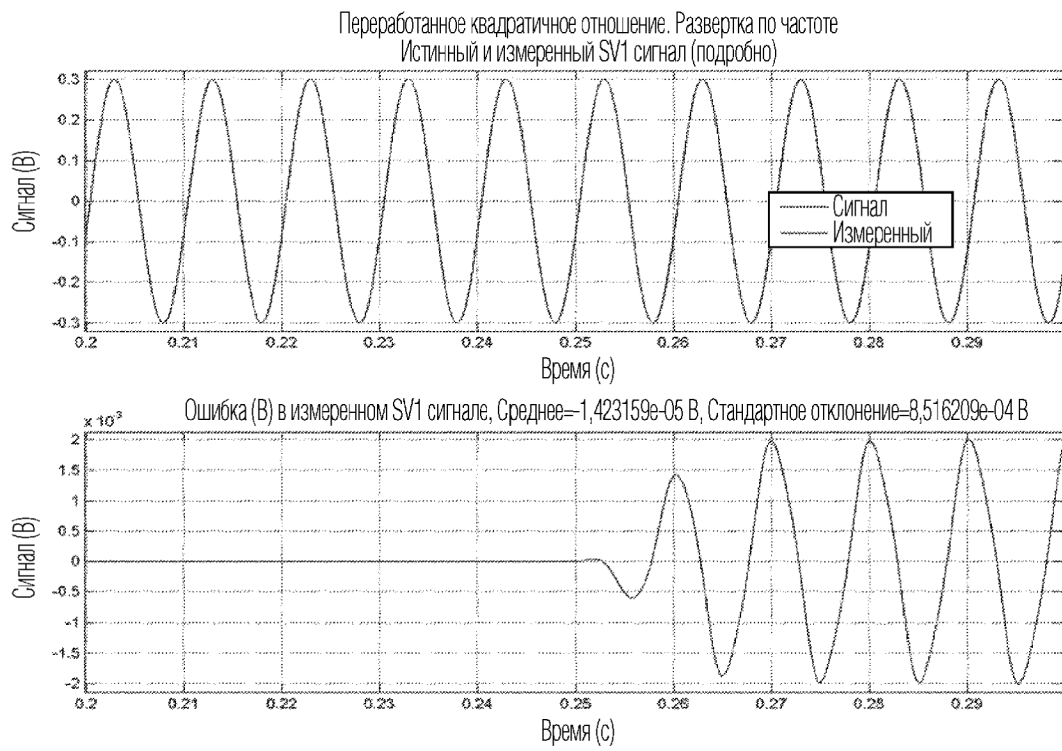
(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention generally relates to flow meters, particularly to Coriolis flow meters. Coriolis flow meter has an exciter which causes tube oscillations, a first sensor configured to generate a first sensor signal which characterizes movement of the tube at a first location, and a second sensor configured to generate a second sensor signal which characterizes movement of the tube at the second location. First and second locations are located so that phase shift between the first and second signals, when the tube oscillates by the

exciter, is connected to mass flow rate of fluid medium through the flow meter. Digital signal processor includes a plurality of detectors tuned to a plurality of different frequencies. Detectors are made with possibility of parallel analysis of the first sensor signal and generation of output signal characterizing how accurately actual frequency of the first sensor signal coincides with frequency, on which the corresponding detector is set.

EFFECT: technical result is higher accuracy.
29 cl, 38 dwg



ФИГ. 16

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ, К КОТОРОЙ ОТНОСИТСЯ ИЗОБРЕТЕНИЕ

[0001] Настоящее изобретение в целом относится к расходомерам и в частности к расходомерам Кориолиса.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

5 [0002] В промышленности используются всевозможные расходомеры для получения информации о расходе многофазных текучих сред. Текучие среды, которые измеряют, могут включать смеси жидкостей и газов. Эта ситуация обычно встречается в нефтегазовой промышленности, где добываемые текучие среды обычно представляют собой смесь нефти, воды и газа. Однако потребность в измерении многофазных текучих
10 сред также возникает и в других отраслях промышленности. Расходомеры также важны в практических применениях, которые не включают многофазных текучих сред.

[0003] Одним из типов расходомеров является расходомер Кориолиса. Расходомер Кориолиса включает в себя электронный трансмиттер и способную к колебаниям расходомерную трубку, через которую может пропускаться текучая среда, подлежащая
15 измерению. Трансмиттер поддерживает колебания расходомерной трубки, посылая сигнал возбуждения к одному или нескольким возбудителям, и осуществляет измерительные расчеты, исходя из сигналов от двух датчиков, которые измеряют перемещение расходомерной трубки. Физика устройства требует, чтобы силы Кориолиса действовали вдоль секции расходомерной трубки между датчиками, давая в результате
20 сдвиг фаз между обычно синусоидальными сигналами датчиков. Данный сдвиг фаз обычно пропорционален массовому расходу текучей среды, проходящей через измерительную секцию расходомерной трубки. Таким образом, сдвиг фаз дает основу для измерения массового расхода текучей среды, протекающей через расходомерную трубку. Частота колебаний расходомерной трубки расходомера Кориолиса варьирует
25 в зависимости от плотности технологической текучей среды в расходомерной трубке. Значение частоты может быть извлечено из сигналов датчиков, благодаря чему также может быть получена плотность текучей среды на основе анализа сигналов датчиков.

[0004] Расходомеры Кориолиса широко используются во всевозможных отраслях промышленности. Прямое измерение массового расхода часто оказывается
30 предпочтительнее измерения на основе объема, поскольку плотность и/или объем вещества могут изменяться в зависимости от температуры и/или давления, тогда как масса остается неизменной. Это особенно важно в нефтегазовой промышленности, где энергосодержание и, следовательно, стоимость продукта зависит от массы. Термин «чистая нефть» («Net Oil») используется в нефтегазовой промышленности для описания
35 расхода нефти в трехфазном или жидком (нефть/вода) потоке. Распространенной задачей в нефтегазовой промышленности является определение чистой нефти, добываемой каждой скважиной во множестве скважин, поскольку данная информация может быть важной при принятии решений, влияющих на добычу на нефтегазовом месторождении и/или на оптимизацию добычи на нефтегазовом месторождении.

40 [0005] Включение газа в жидкий поток вносит ошибки в измерения массового расхода и плотности расходомером Кориолиса. Лабораторные испытания могут использоваться для определения того, как ошибки массового расхода и плотности связаны с другими параметрами, такими как наблюдаемый расход и наблюдаемое уменьшение плотности относительно чистой текучей среды. Эти испытания могут использоваться для
45 разработки эмпирических моделей, которые дают поправки для подсчета некоторой ошибки, связанной с присутствием многофазных текучих сред, включающих газовую и жидкую фазы. Эти эмпирические поправки могут привести к улучшению результатов работы расходомеров Кориолиса в условиях эксплуатации. Дополнительные

подробности, касающиеся использования расходомера Кориолиса для измерения многофазных текучих сред, приводятся в патентах США №№ 6311136; 6505519; 6950760; 7059199; 7313488, 7617055 и 8892371, содержание которых включено в настоящее описание посредством ссылки.

5 [0006] Во многих традиционных расходомерах Кориолиса частота колебаний расходомерной трубки рассчитывается путем измерения времени между переходами через нуль по сигналам датчика. Методы Фурье обычно используется для расчета амплитуды и фазы колебания расходомерной трубки. Например, на фиг.1 показан квадратурный метод, который использовался во многих традиционных расходомерах
10 Кориолиса. В этом методе сигналы датчика умножаются на квадратурную синусоидальную волну, а также квадратурную косинусоидальную волну. Квадратурные произведения интегрируют по времени цикла (длина которого основана на вычислении частоты) с получением I_s для интеграла, полученного путем интегрирования синусоидального произведения, и I_c для интеграла, полученного путем интегрирования
15 косинусоидального произведения. Фазу каждого сигнала датчика вычисляют как арктангенс (I_s/I_c). Амплитуду каждого сигнала датчика вычисляют как квадратный корень из ($I_s^2 + I_c^2$). Вычисленная частота и фаза обеспечивают основу для измерения плотности текучей среды и массового расхода. По мере увеличения плотности текучей
20 среды частота сигнала датчика будет уменьшаться. Кроме того, сдвиг фаз сигналов двух датчиков будет возрастать по мере увеличения массового расхода. В некоторых расходомерах Кориолиса вычисленная частота, амплитуда и фаза также используются для образования синтезированного сигнала возбуждения, который используется для возбуждения колебаний расходомерной трубки.

25 [0007] Поскольку частота расходомерной трубки изменяется (например, в ответ на изменения плотности текучей среды, протекающей через расходомерную трубку), время между переходами через нуль и вычисленная частота также изменяются во время работы расходомера. Следовательно, традиционные расходомеры Кориолиса обновляют значения синусоидальной и косинусоидальной функций каждый новый цикл или в
30 некоторых случаях каждые полцикла. Например, значения для квадратурных функций обычно пересчитываются каждые полцикла с использованием новой вычисленной частоты на основе последних переходов через нуль. Кроме того, когда начало и конец каждого цикла ограничены точками перехода через нуль, как в методе, проиллюстрированном на фиг.1, отсутствуют обновления частоты, амплитуды или
35 фазы в промежуточных точках между переходами через нуль.

[0008] Автор настоящего изобретения осуществил различные усовершенствования, которые будут подробно описаны ниже, применимые в области расходомеров Кориолиса и применимые в области измерения чистой нефти и газа.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

40 [0009] Одним аспектом изобретения является расходомер Кориолиса, имеющий трубку, выполненную с возможностью транспортировки текучей среды через расходомер, возбудитель, выполненный с возможностью колебания трубки, первый датчик, выполненный с возможностью генерирования первого сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки в первом местоположении, второй датчик,
45 выполненный с возможностью генерирования второго сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки во втором местоположении. Первое и второе местоположения расположены таким образом, что сдвиг фаз между первым и вторым сигналами, когда трубка колеблется возбудителем, связан с массовым расходом текучей

среды через расходомер. Расходомер Кориолиса имеет цифровой сигнальный процессор, выполненный с возможностью обнаружения сдвига фаз и определения массового расхода текучей среды с использованием обнаруженного сдвига фаз и вывода сигнала, характеризующего определенный массовый расход. Цифровой сигнальный процессор

5 включает в себя множество детекторов, настроенных на набор различных частот. Детекторы выполнены с возможностью параллельного анализа первого сигнала датчика и формирования выходного сигнала, характеризующего насколько точно фактическая частота первого сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен соответствующий детектор.

10 [0010] Другим аспектом настоящего изобретения является способ возбуждения колебаний трубки расходомера Кориолиса, который включает в себя трубку, выполненную с возможностью транспортировки текучей среды через расходомер, возбудитель, выполненный с возможностью колебания трубки, первый датчик, выполненный с возможностью генерирования первого сигнала датчика,

15 характеризующего перемещение трубки в первом местоположении, второй датчик, выполненный с возможностью генерирования второго сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки во втором местоположении, причем первое и второе местоположения расположены таким образом, что сдвиг фаз между первым и вторым сигналами, когда трубка колеблется возбудителем, связан с массовым расходом

20 текучей среды через расходомер. Способ включает использование множества детекторов, настроенных на набор различных частот для параллельного анализа первого сигнала датчика и формирования выходных сигналов, характеризующих насколько точно фактическая частота первого сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен соответствующий детектор. На возбудитель подается сигнал возбуждения,

25 включающий частоту на основе вычисленной частоты, определенной с использованием выходных сигналов детекторов.

[0011] В дальнейшем изобретение поясняется описанием вариантов его осуществления со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых:

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

30 [0012] На фиг.1 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая способ известного уровня техники для анализа сигналов датчиков в расходомере Кориолиса;

[0013] на фиг.2 представлено изображение в изометрии одного варианта осуществления расходомера Кориолиса;

[0014] на фиг.3 представлен вид сбоку расходомера Кориолиса, показанного на фиг.2;

35 [0015] на фиг.4 представлена принципиальная схема расходомера Кориолиса;

[0016] на фиг.5 представлена принципиальная схема, иллюстрирующую банк детекторов для обработки сигнала из одного или более датчиков расходомера Кориолиса;

[0017] на фиг.6 и фиг.7 представлены графики, показывающие расчетные данные амплитуды и частоты, наряду с фактором соответствия по частоте, для каждого детектора в банке детекторов, анализирующего сигналы при 73,2 Гц и 82,56 Гц, соответственно;

40

[0018] на фиг.8 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая один вариант осуществления колебания трубок расходомера Кориолиса в двух различных изгибных

45 модах;

[0019] на фиг.9 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая один вариант осуществления процессора, который отделяет частотное содержание первой изгибной моды от частотного содержания второй изгибной моды;

[0020] на фиг.10 представлен график, иллюстрирующий зависимость между отношением измерений плотности моды возбуждения к измерениям плотности моды Кориолиса и падением плотности;

[0021] на фиг.11 представлена принципиальная схема одного варианта осуществления системы, которая использует метод временной корреляции для улучшения измерений во время двухфазного потока;

[0022] на фиг.12 представлен график, иллюстрирующий задержку в 0,5 с при измерениях массового расхода расходомерами в системе фиг.11;

[0023] на фиг.13 - фиг.16 представлены графики, иллюстрирующие отклик расходомера Кориолиса на смоделированную развертку по частоте;

[0024] на фиг.17 - фиг.21 представлены графики, иллюстрирующие улучшенный отклик расходомера Кориолиса на смоделированную развертку по частоте после компенсации;

[0025] на фиг.22 - фиг.26 представлены графики, иллюстрирующие отклик расходомера Кориолиса на смоделированную развертку по частоте, амплитуде и сдвигу фаз;

[0026] на фиг.27 показан отклик расходомера Кориолиса на ступенчатое изменение частоты от 100 Гц до 85 Гц;

[0027] на фиг.28 показан отклик расходомера Кориолиса на ступенчатое изменение амплитуды от 0,3 В до 0,05 В;

[0028] на фиг.29 показан отклик на ступенчатое изменение сдвига фаз от 0° до 4°;

[0029] на фиг.30 - фиг.35 показан отклик на сигнал, который имеет установившуюся частоту 100 Гц, установившийся сдвиг фаз 1° и амплитуду, которая циклически изменяется между 0,2 В и 0,3 В при частоте 10 Гц; и

[0030] на фиг.36 - фиг.38 показана регистрация частоты, амплитуды и сдвига фаз в ответ на смоделированный сигнал, имеющий характеристики, аналогичные тем, которые ожидаются во время двухфазного потока.

[0031] Одинаковые номера ссылочных позиций обозначают одинаковые части на всех чертежах.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0032] Один из вариантов осуществления расходомера Кориолиса, в целом обозначенный позицией 215, проиллюстрирован на фиг.2 и фиг.3. Расходомер 215 включает в себя одну или более трубок 18, 20 (также называемых расходомерной трубкой), один или более возбуждителей 46a, 46b для возбуждения колебания трубки (трубок), и пару датчиков 48a, 48b движения, которые генерируют сигналы, характеризующие колебания трубки (трубок). В проиллюстрированном варианте осуществления имеется две трубки 18, 20, два возбуждителя 46a, 46b и два датчика 48a, 48b движения, причем и возбуждители и датчики движения установлены между трубками таким образом, что каждый возбуждатель и датчик движения работает для обеих трубок. Специалистам в данной области понятно, что расходомер Кориолиса может иметь только одну единственную трубку и/или может иметь один единственный возбуждатель. Также имеется в виду, что трубка (трубки) могут иметь и другие конфигурации, чем трубки 18, 20 в проиллюстрированном варианте осуществления.

[0033] Как показано на фиг.2 и фиг.3, расходомер 215 выполнен с возможностью встраивания в трубопровод (не показан), небольшая часть которого удалена или зарезервирована для размещения расходомера. Расходомер 215 включает в себя крепежные фланцы 12 для подсоединения к трубопроводу и центральный коллекторный блок 16, поддерживающий два контура 18 и 20 трубок в параллельных плоскостях, которые ориентированы перпендикулярно трубопроводу. Возбудители 46a, 46b и

датчики 48a, 48b прикреплены между каждым концом контуров 18 и 20. Возбудители 46a, 46b на противоположных концах контуров 18, 20 возбуждаются с помощью цифрового контроллера (не показан) токами равной величины, но противоположного знака (т.е. токами, которые сдвинуты по фазе на 180°), чтобы вызвать вращение прямолинейных участков 26 контуров 18, 20 вокруг их копланарной перпендикулярной средней линии 56 (фиг.2). Неоднократно меняющий направление на противоположное (например, синусоидальный) ток возбуждения, подаваемый к возбудителям 46a, 46b, вызывает колебательное перемещение каждого прямолинейного участка 26, которое описывает форму петли в горизонтальной плоскости вокруг оси 56 симметрии контуров.

Полное боковое смещение контуров 18, 20 в нижних закругленных изгибах 38 и 40 является небольшим, порядка 1/16 дюйма (0,16 см) для 2 футов (60,96 см) длины прямолинейного участка 26 трубки, имеющей диаметр 1 дюйм (2,54 см). Частота колебаний обычно составляет примерно от 70 до 110 Гц, хотя она может варьировать в зависимости от размера и конфигурации расходомерной трубки (трубок).

[0034] Датчики 48a, 48b расположены так, чтобы обнаруживать перемещение расходомерной трубки в различных местоположениях на расходомерной трубке, и выходные сигналы датчиков характеризуют обнаруженное перемещение. Как будет понятно специалистам, эффект Кориолиса вызывает сдвиг фаз между двумя датчиками 48a, 48b, который обычно пропорционален массовому расходу. Кроме того, резонансная частота контуров 18, 20 будет варьировать в зависимости от плотности протекающей через них текучей среды. Таким образом, массовый расход и плотность могут быть измерены с помощью анализа сигналов от датчиков 48a, 48b. Расходомер 215 Кориолиса имеет процессор 101 (фиг.4), выполненный с возможностью приема сигналов от датчиков 48a, 48b, определения сдвига фаз между сигналами датчиков и использования определенного сдвига фаз для определения расхода текучей среды через расходомерную трубку. Процессор 101 также выполнен с возможностью определения частоты одного или более сигналов датчиков и использования определенной частоты для определения плотности текучей среды в расходомерной трубке.

[0035] Различные поправки могут применяться к основным измерениям в результате сдвига фаз между сигналами датчиков 48a, 48b и частоты. Например, многофазные потоки приводят к крайне изменчивому демпфированию колебаний расходомерной трубки, до трех порядков величины более высокому, чем в условиях с единственной фазой. Кроме того, измерения массового расхода и плотности, полученные в условиях многофазного потока, подвержены значительным систематическим и случайным ошибкам, для которых могут быть определены и реализованы алгоритмы коррекции, выполняемые процессором 101. Дополнительные подробности, касающиеся работы расходомеров Кориолиса, приводятся в патентах США №№ 6311136, 6505519, 6950760, 7059199, 7188534, 7614312, 7660681 и 7617055, содержание которых включено в настоящее описание посредством ссылки.

[0036] Обратимся к фиг.4, на которой процессор 101 расходомера 215 Кориолиса является в подходящем случае трансмиттером, который выполнен с возможностью приема сигналов от датчиков 48a, 48b и в некоторых случаях от других инструментов (например, датчика давления и/или температуры), использования принятых сигналов для определения массового расхода и/или плотности текучей среды в расходомерной трубе, а также генерирования подходящих сигналов возбуждения для возбудителей 46a, 46b, и вывода результатов измерений и диагностической информации (например, в систему распределенного управления). Как будет описано более подробно ниже, трансмиттер 101 в подходящем случае обрабатывает сигналы датчиков таким образом,

который отличается от традиционных расходомеров Кориолиса.

[0037] Трансмиттер 101 в подходящем случае включает в себя входы для приема аналоговых сигналов от датчиков 48a, 48b, датчик 54 давления, помещенный для измерения давления текучей среды в линии, и температурный датчик 52, помещенный для измерения температуры текучей среды. Трансмиттер 101 соответствующим образом преобразует аналоговые сигналы, включая, в частности, аналоговые сигналы от датчиков 48a, 48b, в цифровые сигналы. Для преобразования сигналов в цифровую форму могут использоваться различные комбинации аппаратного и программного обеспечения. Например, программируемая пользователем вентильная матрица (FPGA) используется в подходящем случае для оцифровки дискретных значений. Подходящие FPGA, имеющие скорость и мощность, необходимые для осуществления описанных здесь способов, коммерчески доступны от Xilinx Inc., как, например, Zynq 7010, Zynq 7015, Zynq 7020, Zynq 7030, Zynq 7035, Zynq 7045, или Zynq 7100, все из которых являются устройствами системы на кристалле (SoC), которые объединяют FPGA с дополнительными интегральными схемами, которые обеспечивают дополнительную вычислительную мощность на одном и том же чипе. Хотя точные спецификационные характеристики могут варьировать в пределах объема изобретения, типичные характеристики этих SoC включают ARM[®] Dual Core Cortex, 866 МГц - 1 ГГц, 1066-1333 Мб/с DDR3, 28-444k LC FPGA матрицу, 80-2020 DSP slices и 6,25-12,5 Гб/с трансиверы. Следует отметить, что, хотя продукты Zynq, перечисленные выше, используют архитектуру ARM[®], можно использовать и другие архитектуры без отклонения от объема изобретения. Аналогичным образом, спецификации продукта могут отличаться от указанных выше, без отклонения от объема изобретения.

[0038] Как проиллюстрировано на фиг.5, процессор 101 включает в себя множество детекторов 121 (иногда называемое банк детекторов), выполненных с возможностью параллельного анализа одного из сигналов датчика с использованием набора предполагаемых частот, которые включают множество частот, отличающихся друг от друга. Предполагаемые частоты в подходящем случае выбираются таким образом, чтобы они попадали в диапазон частот, соответствующих самым высоким и самым низким ожидаемым частотам основной изгибной моды колебания расходомерной трубки. Диапазон частот различных мод колебаний расходомерной трубки будет изменяться в зависимости от физических свойств расходомерной трубки. Так, в качестве только одного примера, подходящий частотный диапазон для частот в наборе предполагаемых частот составляет от примерно 70 Гц до примерно 110 Гц, что представляет собой диапазон, охватывающий все ожидаемые частоты моды возбуждения расходомера Кориолиса, показанного на фиг.2 и фиг.3.

[0039] Детекторы 121 могут принимать различные формы в пределах широкого объема изобретения. Например, в варианте осуществления, проиллюстрированном на фиг.5, подходящий детектор 121 обычно включает в себя буфер 123, анализатор 125 формы волны, который анализирует сигнал с использованием настроенной частоты, и блок 127 оценки соответствия по частоте, который оценивает, насколько близко настроенная частота соответствует фактической частоте, и выводит фактор соответствия, который используется для выбора одного или более детекторов с предполагаемыми частотами, близкими к текущей фактической частоте.

[0040] Буфер 123 в подходящем случае включает кольцевой буфер, выполненный с возможностью хранения самых последних n дискретных значений сигнала датчика. Число дискретных значений n , хранящихся в кольцевом буфере 123, меняется в зависимости от настроенной частоты и частоты дискретизации. Например, длина строки

дискретных значений, хранящейся в кольцевом буфере, в подходящем случае соответствует длине одного цикла при настроенной частоте, и в этом случае n равно частоте дискретизации, деленной на настроенную частоту для соответствующего детектора. Таким образом, размер каждого буфера 123, выраженный как число дискретных цифровых значений, которые могут в нем быть сохранены, в подходящем случае выбирается для настройки соответствующего детектора на определенную настроенную частоту. Используя приведенный выше пример, в котором предполагаемые частоты находятся в диапазоне от примерно 70 Гц до примерно 110 Гц в сочетании с частотой дискретизации примерно 49,9 кГц, кольцевые буферы 123 выполнены с возможностью хранения от 714 дискретных значений (70 Гц) до 454 дискретных значений (110 Гц). Например, детекторы 121 могут в подходящем случае включать детектор, имеющий кольцевой буфер 123, который хранит каждое возможное целое число дискретных значений между числом дискретных значений для самой короткой строки дискретных значений (соответствующей самой высокой частоте в частотном диапазоне) и самой длинной строки дискретных значений (соответствующей самой низкой частоте в частотном диапазоне). В приведенном выше примере это соответствует 260 различным детекторам 121, имеющим кольцевые буферы 123, выполненные с возможностью хранения строк дискретных значений, имеющих каждое целое число между 454 и 714. Большое число детекторов 121, работающих на многих различных предполагаемых частотах, которые расположены близко друг к другу, может быть желательно с точки зрения точности, однако, следует понимать, что может использоваться и меньшее число детекторов в пределах объема изобретения (например, число дискретных значений, которые могут быть сохранены в каждом кольцевом буфере 123, может возрастать на $n+2$, $n+3$, $n+4$ и т.д.), если это необходимо.

[0041] Детекторы 121 в подходящем случае включают анализатор 125 формы волны, который рассчитывает фазу и амплитуду сигнала датчика с использованием настроенной частоты. Анализаторы 125 формы волны в подходящем случае используют квадратурный метод для расчета фазы и амплитуды. Например, анализаторы 125 формы волны в подходящем случае умножают сигнал датчика на квадратурные функции, сгенерированные при настроенной частоте, получают интегралы I_s и I_c путем интегрирования произведений и используют уравнения $\Phi = \arctan(I_c/I_s)$ для вычисления фазы (Φ), и $A = \sqrt{I_s^2 + I_c^2}$ для вычисления амплитуды (A).

Настроенная частота каждого детектора 121 является статической во время работы расходомера 215. Соответственно, анализатор 125 формы волны для каждого конкретного детектора 121 в подходящем случае выполнен с возможностью использования статических значений синуса и косинуса для квадратурных функций. Например, значения синуса и косинуса, используемые каждым детектором 121, могут храниться в справочной таблице. Анализаторы 125 формы волны в подходящем случае исключают образование новых значений для квадратурных функций во время работы расходомера 215.

[0042] Детекторы 121 выполнены с возможностью анализа сигнала датчика на основе предположения, что настроенная частота является фактической частотой сигнала датчика. Детекторы 121 работают непрерывно, даже когда частота колебаний расходомерной трубки существенно отличается от настроенной частоты для соответствующего детектора. Таким образом, амплитуда и фаза, вычисленные некоторыми или даже большинством детекторов 121, будут иметь минимальное или нулевое значение из-за большой разницы между настроенной частотой для этого

детектора и фактической частотой. Однако один или более детекторов 121 будет иметь настроенную частоту, которая сравнительно близка к фактической частоте сигнала датчика.

[0043] Детекторы выполнены с возможностью оценки того, насколько близка их настроенная частота к фактической частоте сигнала датчика на основе анализа формы волны первого сигнала датчика, представленного дискретными цифровыми значениями, хранящимися в буфере. Степень близости, которая может быть выражена в виде фактора соответствия по частоте, в подходящем случае выводится детектором для использования процессором при идентификации одного или более детекторов, для которых настроенная частота близка к фактической частоте. В качестве альтернативы, процессор может оценивать детекторы и рассчитывать фактор соответствия по частоте для каждого детектора в пределах объема изобретения. Существуют различные способы определения того, насколько близка настроенная частота детектора к фактической частоте. Например, детекторы в подходящем случае выполнены с возможностью использования разницы между вычисленными фазами в разные моменты времени для оценки того, насколько близка настроенная частота к текущей фактической частоте. Когда настроенная частота конкретного анализатора формы волны близка к фактической частоте сигнала датчика, фаза, вычисленная ранее в момент времени, когда самое старое дискретное значение в кольцевом буфере было самым новым дискретным значением, будет приблизительно равна фазе, вычисленной после того, как самое новое дискретное значение было добавлено в буфер. Детекторы в подходящем случае выполнены с возможностью хранения предыдущих фазовых расчетов, поэтому их можно сравнивать с более поздними фазовыми расчетами. В целом, детекторы выполнены с возможностью оценки того, насколько близко предполагаемые частоты соответствуют текущей фактической частоте, путем сравнения одного или более сохраненных значений фазы (например, значений фазы прошлого полного цикла, прошлой половины цикла, прошлой четверти цикла или кратных им величин) с соответствующими ожидаемыми значениями фазы, которые существовали бы, если бы настроенная частота равнялась фактической частоте. В целом, оценка предыдущей фазы соответствует времени t , при котором существует ожидаемое соотношение между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы, при этом ожидаемое соотношение основано на соотношении между t и периодом идеальной формы волны, имеющей частоту, на которую настроен детектор, и анализ включает сравнение фактического соотношения между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы с ожидаемым соотношением между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы.

[0044] На фиг.6 и фиг.7 дополнительно проиллюстрирована работа детекторов 121. На фиг.6 проиллюстрирована работа детекторов 121, когда они используются для обработки сигнала с частотой 73,2 Гц и амплитудой 0,3 В. Каждый из детекторов вычисляет частоту (верхний график), амплитуду (средний график) и фактор соответствия по частоте (нижний график), который в данном случае представляет собой разность между текущим значением фазы и сохраненным значением фазы с того момента, когда самое старое дискретное значение в буфере 123 было самым новым дискретным значением в буфере. Несколько детекторов 121 (например, настроенные на частоту примерно от 100 Гц до 105 Гц) дают оценки частоты, которые существенно отличаются от фактической частоты 73,2 Гц. Несколько других детекторов 121 (например, детекторы, которые настроены ниже примерно 87,5 Гц, и особенно те, которые настроены примерно на 85 Гц, а также те, которые настроены менее чем примерно на 75 Гц), дают оценки частоты, которые довольно близки к фактической частоте. Однако детекторы 121,

настроенные на примерно 73,2 Гц, дают расчетные частоты (на основании расчетов анализатора формы волны), которые близки к частоте, на которую они настроены. Кроме того, как проиллюстрировано на среднем графике, только те детекторы, которые настроены на примерно 73,2 Гц, дают оценку амплитуды, близкую к фактической амплитуде 0,3 В. Кроме того, фактор соответствия по частоте (т.е. разность между текущим значением фазы и сохраненным значением фазы одного цикла назад при настроенной частоте) является наилучшим (в данном случае самым близким к нулю) для детектора 121, который настроен примерно на 72,3 Гц. Таким образом, выходной сигнал анализатора 123 формы волны детектора 121 с наилучшим фактором соответствия представляет собой хорошую оценку фактической частоты, фазы и амплитуды сигнала. Другим фактором, который может использоваться процессором 101 для определения наилучших детекторов 121, является то, что вычисленные частоты, создаваемые наилучшими детекторами, близки к частотам, на которые детекторы настроены. Кроме того, на фиг.6 и фиг.7 показаны выходные сигналы детектора частоты только в один момент времени. Возможно, что некоторые из детекторов, которые не близки к фактической частоте, могут временно создавать выходные сигналы, имеющие малую ошибку (см., например, детекторы частоты при примерно 85 Гц для вычисления частоты на фиг.6). Однако для детекторов частоты, которые не близки к фактической частоте, выходные сигналы могут изменяться в течение относительно короткого промежутка времени. В противоположность этому, уровень ошибок для детекторов, близких к фактической частоте, будет, как правило, более стабильным с течением времени, чем для детекторов, которые не близки к фактической частоте, и в то же время является малым по величине. Эта характеристика также может быть включена в критерии выбора детекторов частоты, которые близки к фактической частоте, и/или в качестве перепроверки для подтверждения выбора подходящих детекторов частоты в качестве детекторов частоты, близких к фактической частоте.

[0045] Фиг.7 является аналогичной, за исключением того, что частота сигнала была изменена на 82,56 Гц. И в этом случае детекторы 121 частоты, имеющие наилучшие факторы соответствия (например, детекторы, настроенные на примерно 82,56 Гц) дают точные оценки амплитуды сигнала и точные вычисления частоты. Кроме того, вычисленные частоты детекторов, настроенных на примерно 82,56 Гц, примерно равны частотам, на которые эти детекторы снова настроены. Таким образом, фактор соответствия обеспечивает основу для определения детекторов, которые настроены на частоты, близкие к фактической частоте сигнала.

[0046] Процессор 101 в подходящем случае использует вычисленную фазу и амплитуду, а также настроенную частоту, из одного или более детекторов 121, которые настроены на частоты, близкие к фактической частоте (например, исходя из частотного фактора соответствия и других описанных выше критериев) для определения частоты, фазы и амплитуды фактического сигнала датчика. При необходимости, процессор 101 в подходящем случае может быть выполнен с возможностью выбора детектора 121, настроенного на частоту, которая ближе всего к текущей фактической частоте (например, путем определения детектора, для которого разность между текущей вычисленной фазой и сохраненной вычисленной фазой в момент времени, в который самое старое дискретное значение в буфере было самым новым дискретным значением в буфере, оказывается ближе всего к нулю), и с возможностью использования настроенной частоты, наряду с фазой и амплитудой, вычисленных наиболее близким детектором, в качестве наилучшего показателя частоты, фазы и амплитуды.

[0047] Однако фактическая частота обычно будет находиться между двумя из

предполагаемых частот. Только редко будет действительно близкое соответствие между любой из предполагаемых частот и фактической частотой. Кроме того, поскольку фактические частоты изменяются, неизбежно будут моменты времени, когда фактическая частота окажется посередине между двумя ближайшими предполагаемыми частотами.

5 Таким образом, в подходящем случае процессор выполнен с возможностью использования интерполяции (например, квадратичной интерполяции) для улучшения значений, полученных для частоты, фазы и амплитуды сигнала датчика. Это может использоваться для уменьшения амплитудной ошибки от примерно 10^{-3} В до примерно 10^{-6} В.

10 [0048] Значения, полученные процессором 101 для частоты, фазы и амплитуды от детекторов 121 с наилучшим соответствием, в подходящем случае используются для измерения плотности и/или массового расхода текучей среды, протекающей через расходомер. Эти значения для частоты, фазы и амплитуды также в подходящем случае
15 используются для генерирования сигнала возбуждения, подаваемого на один или более возбудителей 46a, 46b для колебания трубки.

[0049] Методы обработки данных, описанные в данном документе, обеспечивают несколько различных преимуществ по сравнению с традиционными расходомерами Кориолиса. В отличие от регистрации частоты для традиционного расходомера
20 Кориолиса, описанный в данном документе расходомер 215 не полагается на переходы через нуль для регистрации частоты. Это улучшает регистрацию частоты и точность расходомера 215 по меньшей мере по нескольким причинам. Часть сигнала датчика, близкая к переходу через нуль, является менее точной, чем другие части сигнала датчика, поскольку точки данных с низкой амплитудой более чувствительны к шуму, особенно
25 во время многофазного потока. Кроме того, традиционные расчеты, основанные на переходах через нуль, используют только малую часть сигнала датчика для регистрации частоты. Кроме того, квадратурные функции, используемые для определения амплитуды и фазы сигналов датчиков, основаны на вычисленной частоте, поэтому ошибки в вычисленной частоте вызывают ошибки и в определениях амплитуды и фазы.

30 [0050] Другим ограничением использования традиционного метода перехода через нуль является то, что может существовать не более двух измерений за цикл из-за необходимости ждать перехода через нуль. В случае сигнала датчика 100 Гц это означает, что необходимо ждать 5 мс для каждого обновления. Это может быть значительной задержкой, особенно при многофазном потоке.

35 [0051] В отличие от традиционных методов перехода через нуль, описанные в данном документе методы обработки данных для расходомера 215 Кориолиса используют более высокоамплитудные участки сигнала датчика в дополнение к более низкоамплитудным участкам сигнала датчика для регистрации частоты. Таким образом, регистрация частоты с помощью расходомера 215 Кориолиса менее чувствительна к
40 шуму. Кроме того, нет необходимости ожидать перехода через нуль для осуществления обновления. Вместо этого, обновления могут выполняться многократно в течение каждого полупериода. При необходимости, обновления могут быть выполнены с каждым новым входящим дискретным цифровым значением. Таким образом, можно осуществлять несколько сотен обновлений за цикл. Возможность осуществлять
45 обновления с такой скоростью позволяет значительно улучшить регистрацию частоты, особенно при многофазном потоке.

[0052] Приведенное выше описание иллюстрирует, как использовать один банк детекторов 121 для обработки первого сигнала датчика. Тот же банк детекторов 121 также может быть выполнен с возможностью обработки второго сигнала датчика тем

же самым образом. Аналогичным образом, тот же банк детекторов 121 также может использоваться для обработки третьего сигнала на основе первого и второго сигналов датчиков (например, взвешенной суммы первого и второго сигналов датчиков, разности между первым и вторым сигналами датчика и/или других комбинаций первого и второго сигналов датчиков) таким же образом. В некоторых случаях может быть желательно получить единственную оценку частоты с использованием только одного из доступных сигналов и затем использовать эту частоту для вычисления амплитуды и фазы сигналов. Например, может быть желательно использовать оценку частоты, полученную из комбинированного сигнала датчика в качестве оценки частоты, и основывать вычисления амплитуды и фазы для первого и второго сигналов датчиков на этой частоте. Сигналы, основанные на комбинации первого и второго сигналов датчиков, могут давать наилучшую оценку частоты из-за уменьшения шума в комбинированном сигнале. Кольцевые буферы 123 в подходящем случае хранят все сигналы, подлежащие анализу банком детекторов 121, и сигналы параллельно анализируются банком детекторов. Процессор выполнен с возможностью использовать по меньшей мере одну из оценок частоты (например, наилучшую частоту на основе анализа комбинированного сигнала датчика) для определения плотности текучей среды, проходящей через трубку. Аналогичным образом, в подходящем случае процессор выполнен с возможностью использовать данные фазы из первого и второго сигналов датчиков для определения сдвига фаз и массового расхода через трубку на основе сдвига фаз.

[0053] В качестве альтернативы, расходомер 215 Кориолиса в подходящем случае включает в себя один или несколько дополнительных банков детекторов, в подходящем случае по существу идентичных описанному выше банку детекторов. Дополнительные банки детекторов используются для обработки второго сигнала датчика и комбинированного сигнала датчика по существу таким же образом, как описано выше. Процессор 101 в подходящем случае выполнен с возможностью использования одного или более значений частоты из банков детекторов для определения плотности текучей среды, протекающей через трубку. Аналогичным образом, процессор 101 в подходящем случае выполнен с возможностью использования данных фазы из первого и второго сигналов датчиков для определения массового расхода текучей среды через трубку.

Возбуждение трубки в двух модах одновременно

[0054] Расходомер 215 Кориолиса необязательно выполнен с возможностью возбуждения трубки 18, 20 в двух различных модах одновременно. Традиционные расходомеры Кориолиса вызывают колебания своих трубок в двух различных изгибных модах в процессе работы. Как показано на фиг.8, в традиционном расходомере Кориолиса трубка приводится в колебательное движение в одной моде (обычно называемой «мода возбуждения»), и силы, связанные с эффектом Кориолиса, когда текучая среда течет через колеблющуюся трубку, возбуждают вторичные колебания в другой изгибной моде (обычно называемой «мода Кориолиса»). Следует отметить, что обработка данных банком детекторов, описанным выше, может использоваться для возбуждения колебаний трубок 18, 20 в обеих изгибных модах одновременно. Это может быть желательно для усиления контроля за колебанием трубки 18, 20, что может привести к лучшей регистрации сигналов возбуждения в сложных рабочих условиях, как, например, во время многофазного потока, и для более точных измерений.

[0055] Как схематически показано на фиг.9, процессор 101 в подходящем случае включает в себя один или более фильтров 151, выполненных с возможностью отделения частотного содержания 153 сигнала датчика в первой изгибной моде (например, в традиционной моде возбуждения) от частотного содержания сигнала датчика во второй

изгибной моде 155 (например, которая традиционно называется модой Кориолиса). Часть сигнала, содержащая частоту «моды возбуждения», обрабатывается банком 121 детекторов по существу как указано выше. Процессор 101 включает в себя второй банк 121' детекторов, выполненный с возможностью обработки части сигнала, содержащей «моду Кориолиса». Банк 121' детекторов для моды Кориолиса может быть по существу идентичен описанному выше банку детекторов за исключением того, что может потребоваться корректировка частотного диапазона второго банка 121' детекторов (например, с помощью выбора кольцевых буферов, имеющих различные размеры) для оптимизации второго банка детекторов для другого частотного содержания в моде Кориолиса.

[0056] Процессор 101 в подходящем случае использует значения частоты, фазы и амплитуды, полученные из первого и второго банков 121, 121' детекторов для определения массового расхода и плотности текущей среды, протекающей через трубку. Дополнительная информация о частоте, фазе и амплитуда колебаний в «моду Кориолиса» может обеспечивать дополнительные входные сигналы (например, для нейронных сетей или эмпирических моделей), которые могут давать более точные измерения плотности и массового расхода.

[0057] В качестве альтернативы, можно вычислять дополнительные измерения массового расхода и/или плотности непосредственно из значений частоты, фазы и/или амплитуды, полученных из банка детекторов, который анализирует частотное содержание «моды Кориолиса», и осреднять или иным образом комбинировать эти измерения с другими измерениями для достижения улучшенных результатов. Например, так же, как силы, связанные с эффектом Кориолиса, искажают колебания в моде возбуждения, вызывая сдвиг фаз, также будут существовать силы, связанные с эффектом Кориолиса, которые могут искажать колебания в моде Кориолиса, что создает второй сдвиг фаз. Процессор в подходящем случае выполнен с возможностью детектирования сдвига фаз, связанного с «модой возбуждения», и сдвига фаз, связанного с «модой Кориолиса», и использования обоих сдвигов фаз для определения массового расхода.

[0058] На фиг.10 показан график, иллюстрирующий отношение плотности, вычисленной с использованием частоты «моды возбуждения», как описано выше, к плотности, вычисленной с использованием частоты «моды Кориолиса», также как описано выше, в зависимости от падения плотности (что может быть связано с началом двухфазного потока) при различных расходах в диапазоне от 0,5 кг/с до 3,0 кг/с. Существует по существу линейная зависимость в этом отношении от примерно 0 до примерно 30% падения плотности и особенно от примерно 0 до примерно 20% падения плотности. Это указывает на то, что отношение плотности моды возбуждения к плотности моды Кориолиса может быть скоррелировано с началом двухфазного потока. Это дает лишь один пример того, как процессор 101 может использовать измерения из «моды возбуждения» в сочетании с измерениями из «моды Кориолиса» для вывода взаимосвязей, которые могут повысить точность и другие критерии эффективности.

[0059] Процессор 101 также в подходящем случае имеет генератор сигнала возбуждения, выполненный с возможностью создания сигнала возбуждения для одного или более возбудителей 46a, 46b, который включает первый компонент 153, выбранный для возбуждения колебаний трубки с первой частотой (например, с частотой «моды возбуждения»), и второй компонент 155, выбранный для возбуждения колебаний трубки со второй частотой (например, частотой «моды Кориолиса»). Кроме того, генератор сигнала возбуждения в подходящем случае выполнен с возможностью комбинирования первого и второго компонентов одновременно друг с другом, благодаря чему

возбудитель (возбудители) возбуждает (возбуждают) трубку в первой изгибной моде (например, «моде возбуждения») и во второй изгибной моде (например, моде Кориолиса) одновременно. Например, описанный в данном документе расходомер 215 Кориолиса имеет два возбудителя 46a, 46b, и генератор сигнала возбуждения в подходящем случае выполнен с возможностью подачи двухмодового сигнала возбуждения к каждому из возбудителей. Для моды возбуждения в случае расходомера Кориолиса, имеющего два возбудителя, сигналы возбуждения должны быть сдвинуты по фазе друг относительно друга. Однако для возбуждения в так называемой моде Кориолиса сигналы возбуждения должны быть синфазными. Таким образом, используя d1 для обозначения компонента сигнала возбуждения, который соответствует моде возбуждения, и d2 для обозначения компонента сигнала возбуждения, соответствующего моде Кориолиса, процессор 101 в подходящем случае выполнен с возможностью подачи к одному из возбудителей сигнала, содержащего d1+d2, и подачи к другому возбудителю сигнала, содержащего -d1+d2. В качестве альтернативы, двухмодовый сигнал возбуждения может подаваться только в один из двух возбудителей без отклонения от объема изобретения. Кроме того, расходомер Кориолиса, имеющий только один возбудитель, может возбуждаться в двух изгибных модах одновременно с использованием способов, описанных в настоящей заявке.

[0060] Поскольку расходомер 215 Кориолиса возбуждает трубку 18, 20 в моде возбуждения, а также в моде Кориолиса, движение трубки можно более точно контролировать, особенно в сложных условиях эксплуатации. Процессор 101 в подходящем случае контролирует амплитуду колебаний в обеих изгибных модах одновременно. Например, сигнал возбуждения в подходящем случае может быть скорректирован таким образом, чтобы регулировать амплитуду трубки 18, 20 в первой и второй колебательных изгибных модах с использованием ПИД-регулятора. Подходящий ПИД-регулятор имеет два входа (один для амплитуды колебаний в каждой изгибной моде) и два выхода (один для уровня возбуждения для каждой изгибной моды). ПИД-регулятор в подходящем случае выбирает уровни возбуждения для поддержания амплитуд колебаний в двух различных изгибных модах при соответствующих заданных значениях. Уровни возбуждения можно регулировать независимо друг от друга, что может быть необходимо для поддержания колебаний в каждой изгибной моде на желаемом уровне.

Измерения, основанные на корреляции по времени между двумя расходомерами

[0061] Расходомер 215 Кориолиса, описанный выше или подобный ему, может быть скомбинирован с другим расходомером 215' Кориолиса с получением системы 171 для измерения расхода многофазной текучей среды на основе корреляции по времени между измерениями двух расходомеров Кориолиса. Как показано на фиг. 11, первый и второй расходомеры 215, 215' Кориолиса, которые в данном варианте осуществления по существу идентичны друг другу и описанному выше расходомеру 215 Кориолиса, установлены в разных местах одного и того же трубопровода 181. Каждый из расходомеров 215, 215' Кориолиса выдает изменяющийся во времени результат измерения массового расхода текучей среды, протекающей через соответствующий расходомер, и изменяющийся во времени результат измерения плотности текучей среды, протекающей через соответствующий расходомер. Процессор 183 в подходящем случае включает в себя коррелятор, который сравнивает по меньшей мере один из изменяющихся во времени результатов измерения массового расхода и изменяющихся во времени результатов измерения плотности первого расходомера 215 Кориолиса с соответствующими результатами измерений изменяющегося во времени массового

расхода или изменяющейся во времени плотности второго расходомера 215' Кориолиса, и определяет задержку по времени между соответствующими измерениями. Например, на фиг.12 показана задержка 0,5 с в соответствующих частях изменяющихся во времени измерений массового расхода расходомеров 215, 215'. Процессор 183 использует

5 определенную задержку по времени для получения вычисленной скорости компонента многофазного потока в трубе 181.

[0062] Измерительная система 171 корректирует по меньшей мере одно из измерений массового расхода и плотности с использованием вычисленной скорости. Например, система 171 в подходящем случае использует вычисленную скорость для характеристики

10 скольжения между газовой фазой и жидкой фазой многофазной текучей среды и для корректировки измерений массового расхода и/или плотности в зависимости от скольжения. В целом, задержка, связанная с измерениями массового расхода, связана со скоростью жидкой фазы, тогда как задержка, связанная с измерениями плотности, связана со скоростью газовой фазы. Оценку скорости жидкой фазы можно использовать

15 для коррекции измерения массового расхода и/или плотности. Скорость газовой фазы также можно использовать для коррекции измерений массового расхода и/или плотности. При необходимости, оценки скорости жидкой фазы и оценки скорости газовой фазы могут использоваться совместно для получения поправок измерений массового расхода и/или плотности. Поправки могут быть получены многими способами, в том числе с

20 использованием нейронных сетей и/или эмпирических моделей. Как показано на фиг.11, система 171 в подходящем случае использует дополнительную информацию, включающую измерения давления и температуры из наборов 185 датчиков давления и температуры и других датчиков 187 в качестве входных данных для определения поправок. Кроме того, может быть предпочтительно гарантировать хорошее

25 перемешивание двухфазного потока, когда текучая среда входит в расходомеры 215, 215'. Таким образом, система 171, проиллюстрированная на фиг.11, включает в себя стабилизатор 189 потока, находящийся рядом и выше по потоку от каждого расходомера 215, 215'.

[0063] Следующие примеры включают в себя иллюстрации того, как расходомер 215 Кориолиса и, в частности, процессор 101 работает с использованием различных смоделированных сигналов. Примеры иллюстрируют надежное функционирование в различных условиях. Кроме того, примеры показывают, каким образом различные поправки могут использоваться для повышения эффективности.

[0064] На фиг.13 - фиг.16 показана работа процессора 101 во время упрощенного

35 моделирования изменения частоты, соответствующего изменению частоты, которое может возникать при переходе трубки из пустого состояния в заполненное жидкостью. Частота падает от 100 Гц до 85 Гц через 0,5 с. Верхний график на фиг. 13 показывает, что существует задержка на один цикл в отклике частоты, что приводит к ошибке на нижнем графике. На фиг.14 и фиг.15 показано, что существует ошибка, связанная с

40 задержкой в полцикла в отклике амплитуды, а также в отклике сдвига фаз. На фиг.16 показана ошибка в измеренном сигнале в начале изменения частоты. Кроме того, на фиг.13 - фиг.16 показано, что имеются структурированные ошибки модуляции во многих измерениях, связанные с быстрыми изменениями, такими как быстрое изменение в частоте во время развертки по частоте.

[0065] На фиг.17 - фиг.22 показано улучшение эффективности процессора 101 после осуществления следующих компенсаций. Во-первых, динамический отклик компенсируется с учетом задержки в полцикла в амплитуде и сдвиге фаз, а также задержки в полный цикл в отклике частоты. Другая компенсация заключается в

использовании квадратичной экстраполяции на основе последнего цикла данных для улучшения измерений. Кроме того, компенсируются ошибки модуляции. В результате, ошибки, которые представлены на нижних графиках на фиг.17 - фиг.22, оказываются меньше, чем на соответствующих графиках для некомпенсированного примера.

5 Компенсации в целом оказываются успешными, но в меньшей степени в начале и в конце быстрого перехода.

[0066] На фиг.22 - фиг.26 проиллюстрирован отклик процессора 101 на смоделированное одновременное изменение частоты, амплитуды и сдвига фаз. Частота падает от 100 Гц до 85 Гц, амплитуда падает от 0,3 В до 0,05 В, и сдвиг фаз увеличивается от 0° до 4°, все за 0,5 с. Это представляет собой более реалистичное моделирование условий, которые могут возникать при заполнении расходомера жидкостью, поскольку не только изменение резонансной частоты (аналогично падению от 100 Гц до 85 Гц в смоделированных сигналах), но и повышенное затухание колебаний на трубке, вероятно, приведет к падению амплитуды колебаний (аналогично падению амплитуды от 0,3 В до 0,05 В в смоделированных сигналах), в то время как расход быстро меняется от нуля до положительного значения и, следовательно, вызывает резкое увеличение в сдвиге фаз (аналогичное увеличению сдвига фаз от 0° до 4° в смоделированных сигналах). Применяются компенсации, аналогичные использованным на фиг.17 - фиг.21. Опять же, компенсации в целом оказываются успешными при минимизации ошибки, но в 15 20 меньшей степени в начале и в конце периода быстрого перехода.

[0067] На фиг.27 показан отклик на ступенчатое изменение частоты от 100 Гц до 85 Гц. Такое мгновенное изменение вряд ли может быть вызвано каким-либо физическим изменением, связанным с реальными условиями потока, но смоделированные ступенчатые изменения используются для проверки устойчивости системы 101 к очень 25 резким изменениям. На фиг.28 показан отклик на ступенчатое изменение амплитуды от 0,3 В до 0,05 В. На фиг.29 показан отклик на ступенчатое изменение в сдвиге фаз от 0° до 4°. Сигналы ошибки на нижних графиках фиг.27 - фиг.29 показывают, что ошибки, связанные с переходами, ограничены в пределах двух циклов изменения. В отличие от этого, процессор традиционного расходомера Кориолиса обычно требует примерно 30 300 мс для восстановления после этих ступенчатых изменений. Таким образом, испытания, проиллюстрированные на фиг.27 - фиг.29, показывают, что система 101 значительно более устойчива к внезапным изменениям, чем традиционные расходомеры Кориолиса.

[0068] На фиг.30 - фиг.35 показан отклик процессора 101 на сигнал, который имеет 35 установившуюся частоту 100 Гц и установившийся сдвиг фаз 1°. Амплитуда сигнала составляет 0,25 В +/- 0,05 В, модулируемая при 10 Гц, что составляет примерно 10% частоты возбуждения. Сигналы ошибки на нижних графиках на фиг.30 - фиг.35 наглядно демонстрируют, что регистрация в целом является достаточно хорошей. Однако, как и раньше, ошибка является самой высокой в начале и в конце периода перехода, и 40 существуют различные меньшие ошибки модуляции, видимые в сигнале по всей модуляции смоделированного сигнала. Можно дополнительно повысить эффективность с помощью компенсации этих ошибок. Например, на фиг.31 показана нескорректированная амплитудная ошибка, и на фиг.32 показана скорректированная амплитудная ошибка, которая значительно меньше.

45 [0069] На фиг.36 - фиг.38 проиллюстрирована эффективность процессора 101 во время моделирования двухфазного потока. Смоделированный сигнал имеет частоту, изменяющуюся случайным образом около 90 Гц. Амплитуда изменяется случайным образом около 0,1 В. Сдвиг фаз изменяется случайным образом около 2°. Измеренные

частота, амплитуда и сдвиг фаз хорошо согласуются со смоделированным сигналом. Это указывает на то, что эффективность процессора 101 для этих смоделированных условий выгодно отличается от процессоров существующих расходомеров Кориолиса при двухфазном потоке.

5 [0070] При включении элементов аспектов настоящего изобретения или вариантов его осуществления формы слов единственного числа и выражение «указанный» подразумевают, что имеется один или несколько элементов. Термины «содержащий», «включающий в себя» и «имеющий» подразумевает включение и означают, что могут быть дополнительные элементы, отличные от перечисленных элементов.

10 [0071] Учитывая вышесказанное, ясно, что достигнуты несколько преимуществ аспектов изобретения и получены другие выгодные результаты.

[0072] Не все показанные компоненты, которые проиллюстрированы или описаны, могут быть необходимы. В дополнение к этому, некоторые реализации и варианты осуществления могут включать в себя дополнительные компоненты. Изменения в
15 компоновке и типе компонентов могут быть сделаны без отклонения от сущности или объема формулы изобретения, изложенной в настоящей заявке. Кроме того, могут быть предусмотрены другие или меньшее количество компонентов, и компоненты могут быть комбинированы. В качестве альтернативы или в дополнение, компонент может быть реализован с помощью нескольких компонентов.

20 [0073] Приведенное выше описание иллюстрирует аспекты изобретения в качестве примера, а не для ограничения. Это описание позволяет специалисту в данной области техники разрабатывать и использовать аспекты изобретения, и описывает несколько вариантов осуществления, адаптаций, изменений, альтернативных решений и применений аспектов изобретения, включая и то, что в настоящее время считается наилучшим
25 способом осуществления аспектов изобретения. Кроме того, следует понимать, что аспекты изобретения не ограничены в применении к деталям конструкции и компоновке компонентов, изложенным в последующем описании или проиллюстрированным на чертежах. Аспекты изобретения допускают и другие варианты осуществления и могут быть реализованы или выполнены различными способами. Также следует понимать,
30 что используемая здесь фразеология и терминология представлена с целью описания и не должна рассматриваться как ограничивающая.

[0074] После подробного описания аспектов изобретения будет очевидно, что возможны изменения и модификации без отклонения от объема аспектов изобретения, как определено в прилагаемой формуле изобретения. Предполагается, что различные
35 изменения могут быть сделаны в описанных выше конструкциях, продуктах и способах без отклонения от объема аспектов изобретения. В предшествующем описании различные предпочтительные варианты осуществления описаны со ссылкой на прилагаемые чертежи. Однако, очевидно, что в них могут быть внесены различные изменения и модификации, и могут быть реализованы дополнительные варианты
40 осуществления, без отклонения от более широкого объема аспектов изобретения, определяемого в формуле изобретения, которая следует ниже. Соответственно, описание и чертежи должны рассматриваться в иллюстративном, а не ограничивающем смысле.

[0075] Реферат приводится для определения технической сущности изобретения и не служит для интерпретации или ограничения объема формулы изобретения.

45

(57) Формула изобретения

1. Расходомер Кориолиса, содержащий:

трубку, выполненную с возможностью транспортировки текучей среды через

расходомер;

возбудитель, выполненный с возможностью колебания трубки;

первый датчик, выполненный с возможностью генерирования первого сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки в первом местоположении;

5 второй датчик, выполненный с возможностью генерирования второго сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки во втором местоположении, причем первое и второе местоположения расположены таким образом, что сдвиг фаз между первым и вторым сигналами, когда трубка колеблется возбудителем, соотносится с массовым расходом текучей среды через расходомер;

10 цифровой сигнальный процессор, выполненный с возможностью обнаружения сдвига фаз и определения массового расхода текучей среды с использованием обнаруженного сдвига фаз и вывода сигнала, характеризующего определенный массовый расход,

при этом цифровой сигнальный процессор содержит множество детекторов, настроенных на набор различных частот, причем детекторы выполнены с возможностью 15 параллельного анализа по меньшей мере одного сигнала датчика и генерирования выходного сигнала, характеризующего насколько точно фактическая частота указанного по меньшей мере одного сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен соответствующий детектор.

2. Расходомер Кориолиса по п.1, в котором каждый из указанного множества 20 детекторов содержит буфер, выполненный с возможностью хранения серии дискретных цифровых значений указанного по меньшей мере одного сигнала датчика, причем серия имеет число дискретных цифровых значений, которое выбрано для настройки соответствующего детектора на определенную частоту из указанного набора различных частот.

25 3. Расходомер Кориолиса по п.2, в котором указанный выходной сигнал, характеризующий насколько точно фактическая частота указанного по меньшей мере одного сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен соответствующий детектор, основан на анализе формы волны указанного по меньшей мере одного сигнала датчика, представленного дискретными цифровыми значениями, хранящимися в буфере.

30 4. Расходомер Кориолиса по п.3, в котором анализ включает сравнение оценки текущей фазы формы волны указанного по меньшей мере одного сигнала датчика с оценкой предыдущей фазы формы волны.

5. Расходомер Кориолиса по п.4, в котором оценка предыдущей фазы соответствует 35 времени t , при котором существует ожидаемое соотношение между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы, при этом ожидаемое соотношение основано на соотношении между t и периодом идеальной формы волны, имеющей частоту, на которую настроен детектор, и анализ включает сравнение фактического соотношения между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы с ожидаемым соотношением между оценкой текущей фазы и оценкой предыдущей фазы.

40 6. Расходомер Кориолиса по п.4, в котором оценка предыдущей фазы формы волны включает оценку фазы с момента времени, когда дискретное значение, находящееся в настоящий момент времени в конце серии дискретных цифровых значений, соответствующих самым старым данным, находилось в конце серии дискретных цифровых значений, соответствующих новейшим данным.

45 7. Расходомер Кориолиса по любому из пп.4-6, в котором цифровой сигнальный процессор использует квадратурный анализ для получения оценок фазы.

8. Расходомер Кориолиса по п.7, в котором детекторы выполнены с возможностью использования статических значений синуса и косинуса для осуществления

квадратурного анализа.

9. Расходомер Кориолиса по любому из пп.2-8, в котором буфер включает кольцевой буфер.

10. Расходомер Кориолиса по любому из пп.2-9, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью идентификации детекторов, которые настроены на частоты, близкие к указанному по меньшей мере одному сигналу датчика, и использования интерполяции для определения измерения частоты, которое находится между частотами, на которые настроены идентифицированные детекторы.

11. Расходомер Кориолиса по любому из пп.1-10, в котором указанная частота, связанная с указанным по меньшей мере одним сигналом датчика, соответствует частоте изгибной моды колебаний трубки.

12. Расходомер Кориолиса по любому из пп.1-12, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью определения плотности текучей среды, протекающей через трубку, с использованием оценки частоты, определенной с помощью детекторов.

13. Расходомер Кориолиса по любому из пп.1-12, в котором множество детекторов представляет собой первое множество детекторов и выполнено с возможностью измерения первой частоты, связанной с указанным по меньшей мере одним сигналом датчика, при этом цифровой сигнальный процессор также содержит второе множество детекторов, выполненное с возможностью параллельной работы с другим множеством, для измерения второй частоты, связанной с указанным по меньшей мере одним сигналом датчика, причем вторая частота отличается от первой частоты.

14. Расходомер Кориолиса по п.13, в котором первая частота соответствует частоте первой изгибной моды трубки и вторая частота соответствует частоте второй изгибной моды трубки.

15. Расходомер Кориолиса по любому из пп.13 и 14, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью определения плотности текучей среды в трубке с использованием измеренной первой и второй частоты.

16. Расходомер Кориолиса по любому из пп.13-15, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью вывода сигнала возбуждения к возбудителю для возбуждения колебания трубки, при этом сигнал возбуждения включает первый компонент, выбранный для возбуждения колебания трубки с первой частотой, и второй компонент, выбранный для возбуждения колебания трубки со второй частотой, при этом генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью комбинирования первого и второго компонентов одновременно друг с другом, благодаря чему возбудитель возбуждает трубку в первой изгибной моде и во второй изгибной моде одновременно.

17. Система для измерения расхода многофазной текучей среды, содержащая: первый и второй расходомеры Кориолиса, каждый по любому из пп.1-16, при этом каждый из первого и второго расходомеров Кориолиса выводит изменяющееся во времени измерение массового расхода текучей среды, протекающей через соответствующий расходомер, и изменяющееся во времени измерение плотности текучей среды, протекающей через соответствующий расходомер;

коррелятор сигнала, который сравнивает по меньшей мере одно из изменяющегося во времени измерения массового расхода и изменяющегося во времени измерения плотности первого расходомера Кориолиса с соответствующими измерениями изменяющегося во времени массового расхода или изменяющейся во времени плотности второго расходомера Кориолиса и определяет задержку по времени между

соответствующими измерениями; и

измерительную систему, которая использует определенную задержку по времени для получения вычисленной скорости компонента многофазного потока и корректирует по меньшей мере одно из измерений массового расхода и плотности с использованием вычисленной скорости.

18. Система по п.17, выполненная с возможностью использования вычисленной скорости для характеристики скольжения между газовой фазой и жидкой фазой многофазной текучей среды и корректировки указанного по меньшей мере одного из измерений массового расхода и плотности в зависимости от скольжения.

19. Система по любому из пп.17 и 18, выполненная с возможностью корреляции изменяющегося во времени измерения массового расхода первого расходомера Кориолиса с соответствующим измерением изменяющегося во времени массового расхода второго расходомера Кориолиса, использования задержки по времени для получения вычисленной скорости жидкой фазы многофазного потока и корректировки по меньшей мере одного из измерений массового расхода и плотности с использованием вычисленной скорости жидкой фазы.

20. Система по любому из пп.17-19, выполненная с возможностью корреляции изменяющегося во времени измерения плотности первого расходомера Кориолиса с изменяющимся во времени измерением плотности второго расходомера Кориолиса, использования задержки по времени для получения вычисленной скорости газовой фазы многофазного потока и корректировки по меньшей мере одного из измерений массового расхода и плотности с использованием вычисленной скорости газовой фазы.

21. Расходомер Кориолиса по любому из пп.1-16, дополнительно содержащий цифровой генератор сигнала возбуждения, выполненный с возможностью образования сигнала возбуждения на основе по меньшей мере одного из первого и второго сигналов датчика и направления сигнала возбуждения к возбудителю для колебания трубки, при этом сигнал возбуждения включает первый компонент, выбранный для возбуждения колебания трубки в первой колебательной изгибной моде, и второй компонент, выбранный для возбуждения колебания трубки во второй колебательной изгибной моде, отличной от первой колебательной изгибной моды, при этом генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью комбинирования первого и второго компонентов одновременно друг с другом, благодаря чему возбудитель возбуждает трубку в первой и второй колебательных изгибных модах одновременно.

22. Расходомер Кориолиса по п.21, в котором возбудитель является первым возбудителем и сигнал возбуждения является первым сигналом возбуждения, причем расходомер Кориолиса дополнительно содержит второй возбудитель, выполненный с возможностью колебания трубки, причем первый и второй возбудители расположены в разных местоположениях на трубке, цифровой генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью образования второго сигнала возбуждения на основе по меньшей мере одного из первого и второго сигналов датчика, при этом второй сигнал возбуждения включает в себя первый компонент и второй компонент, при этом генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью комбинирования первого и второго компонентов одновременно друг с другом во втором сигнале возбуждения, благодаря чему первый и второй возбудители вместе возбуждают трубку в первой и второй колебательных изгибных модах одновременно.

23. Расходомер Кориолиса по любому из пп.21 и 22, в котором генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью регулирования амплитуды колебаний трубки в первой колебательной изгибной моде и регулирования амплитуды колебаний трубки

во второй колебательной изгибной моде.

24. Расходомер Кориолиса по п.23, в котором генератор сигнала возбуждения выполнен с возможностью регулирования амплитуды колебаний трубки в первой и второй колебательных изгибных модах с помощью ПИД-регулятора.

5 25. Расходомер Кориолиса по п.24, в котором ПИД-регулятор содержит два входа и два выхода, причем входы соответствуют информации об амплитудах колебания в первой и второй изгибных модах, соответственно, и два выхода соответствуют информации об уровнях возбуждения, выбранных для поддержания амплитуд колебания в первой и второй модах при соответствующих заданных значениях.

10 26. Расходомер Кориолиса по любому из пп.21-25, в котором указанный сдвиг фаз является первым сдвигом фаз, причем первый сдвиг фаз связан с искажением первой колебательной изгибной моды, вызванным потоком массы через трубку, причем цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью определения второго сдвига фаз, который связан с искажением второй колебательной изгибной моды,
15 вызванным потоком массы через трубку, при этом цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью определения массового расхода текучей среды, используя первый и второй сдвиги фаз.

27. Расходомер Кориолиса по любому из пп.21-26, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью измерения плотности текучей среды в трубке,
20 используя частоту по меньшей мере одной из первой и второй колебательных изгибных мод.

28. Расходомер Кориолиса по п.27, в котором цифровой сигнальный процессор выполнен с возможностью определения плотности текучей среды в трубке, используя частоту первой колебательной изгибной моды и частоту второй колебательной изгибной
25 моды.

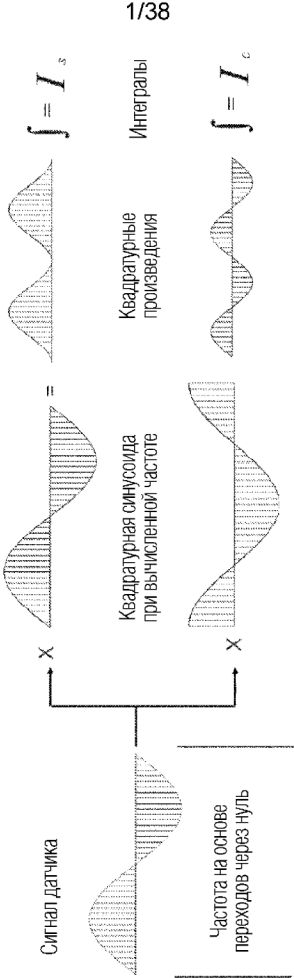
29. Способ возбуждения колебаний трубки расходомера Кориолиса, который содержит: трубку, выполненную с возможностью транспортировки текучей среды через расходомер; возбудитель, выполненный с возможностью колебания трубки; первый датчик, выполненный с возможностью генерирования первого сигнала датчика,
30 характеризующего перемещение трубки в первом местоположении; второй датчик, выполненный с возможностью генерирования второго сигнала датчика, характеризующего перемещение трубки во втором местоположении, причем первое и второе местоположения расположены таким образом, что сдвиг фаз между первым и вторым сигналами, когда трубка колеблется возбудителем, соотносится с массовым
35 расходом текучей среды через расходомер; причем в способе:

используют множество детекторов, настроенных на набор различных частот для параллельного анализа первого сигнала датчика и формирования выходных сигналов, характеризующих насколько точно фактическая частота первого сигнала датчика совпадает с частотой, на которую настроен соответствующий детектор;

40 подают на возбудитель сигнала возбуждения, включающего частоту на основе вычисленной частоты, определенной с использованием выходных сигналов детекторов.

1

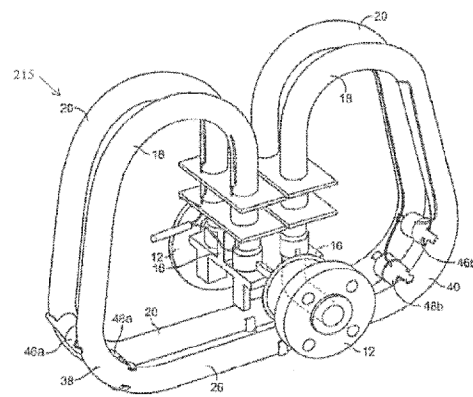
ФИГ. 1



2

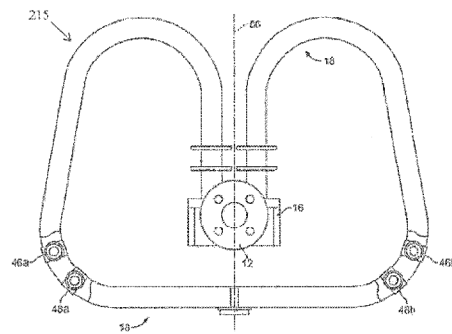
2/38

ФИГ. 2



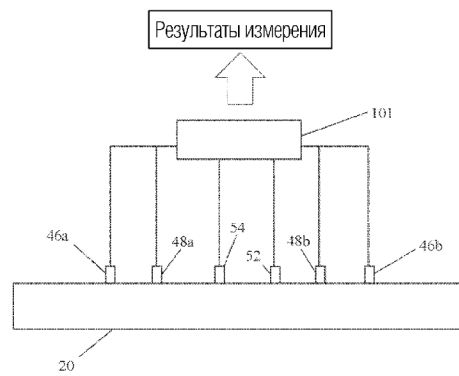
3/38

ФИГ. 3

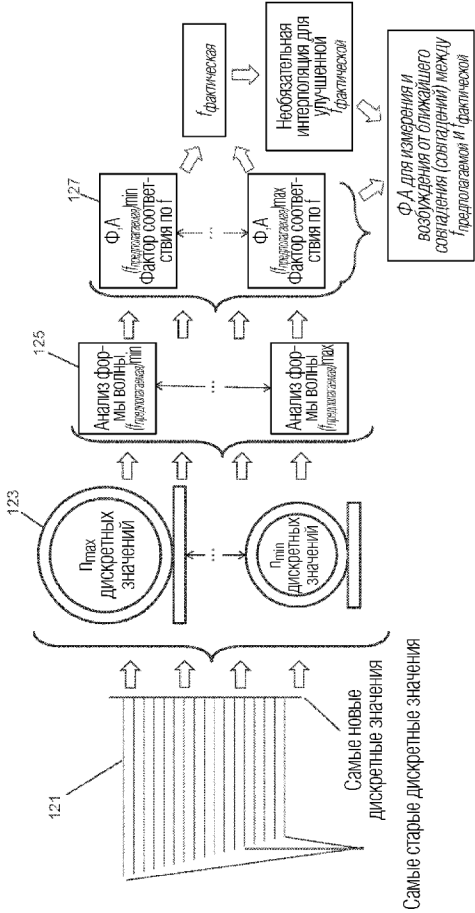


4/38

ФИГ. 4

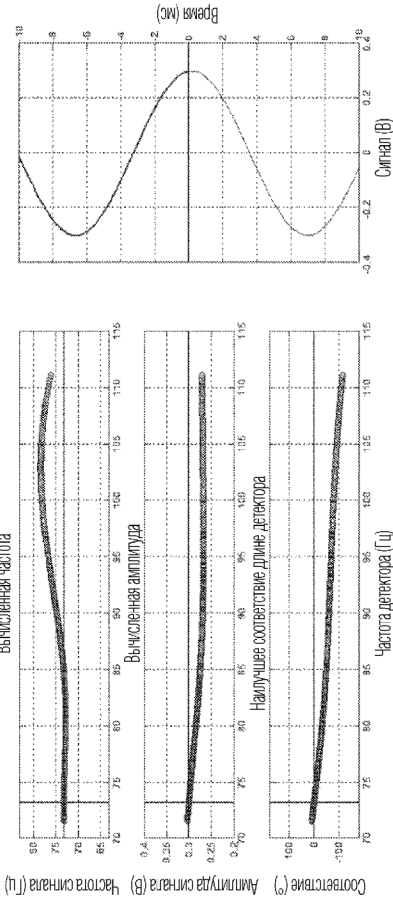


ФИГ. 5



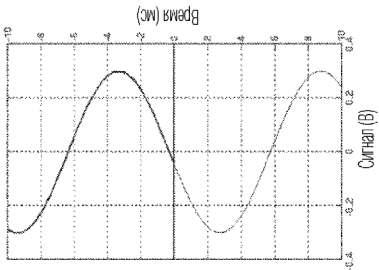
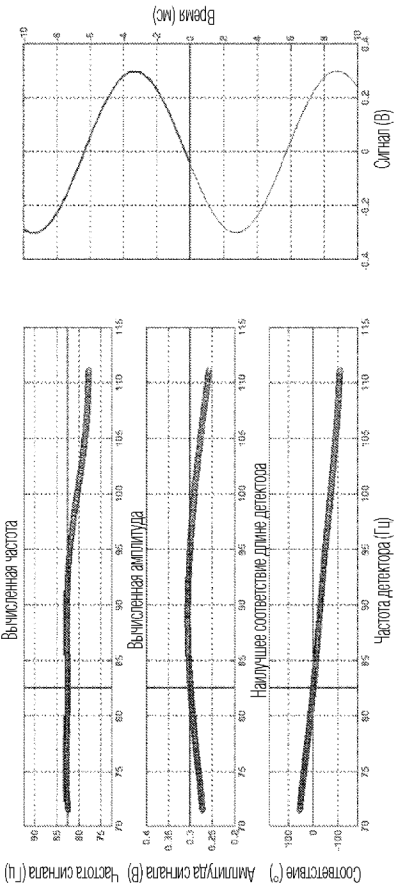
6/38

ФИГ. 6



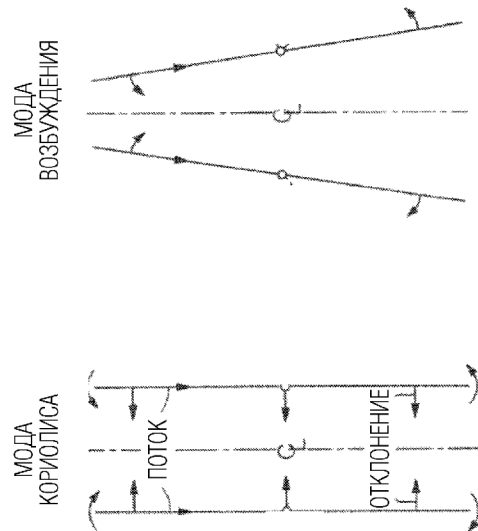
7/38

ФИГ. 7



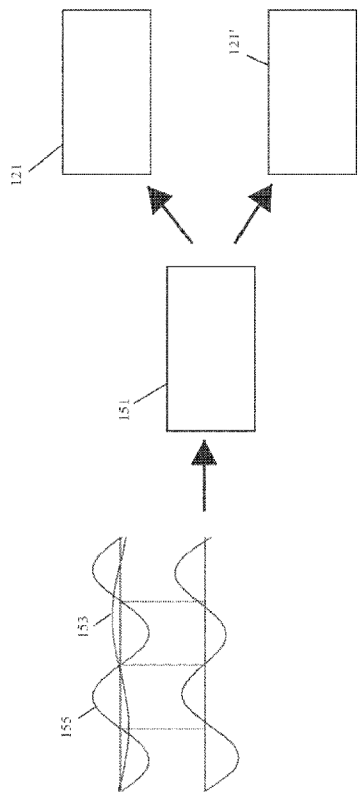
8/38

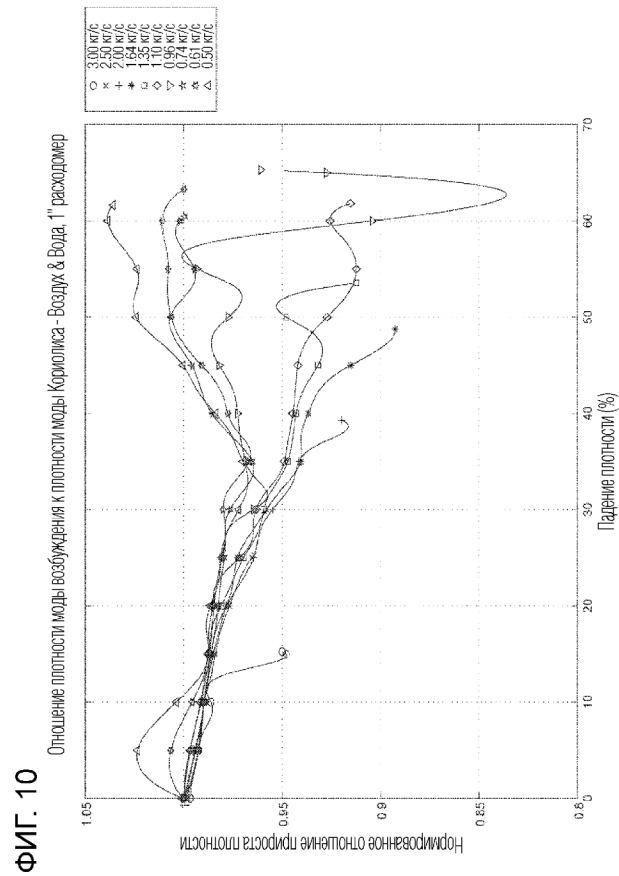
ФИГ. 8



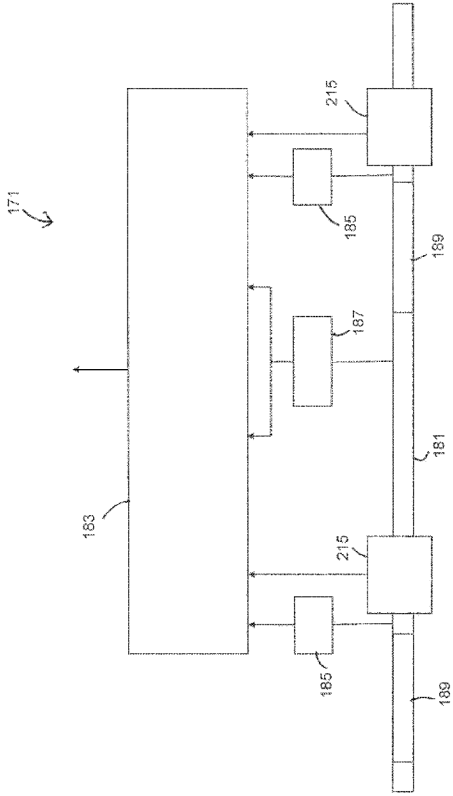
9/38

ФИГ. 9

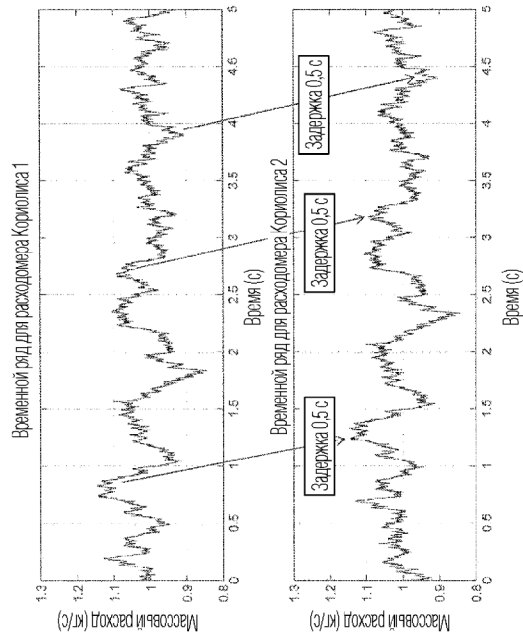




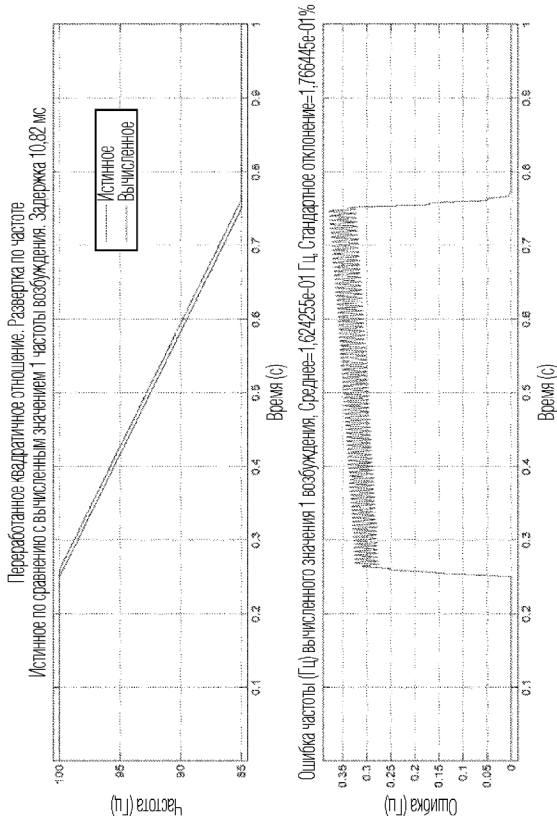
ФИГ. 11



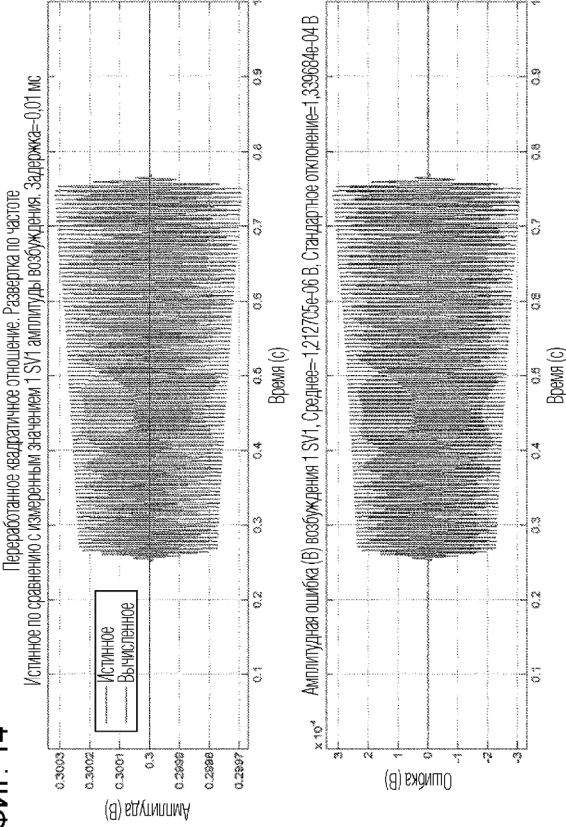
ФИГ. 12



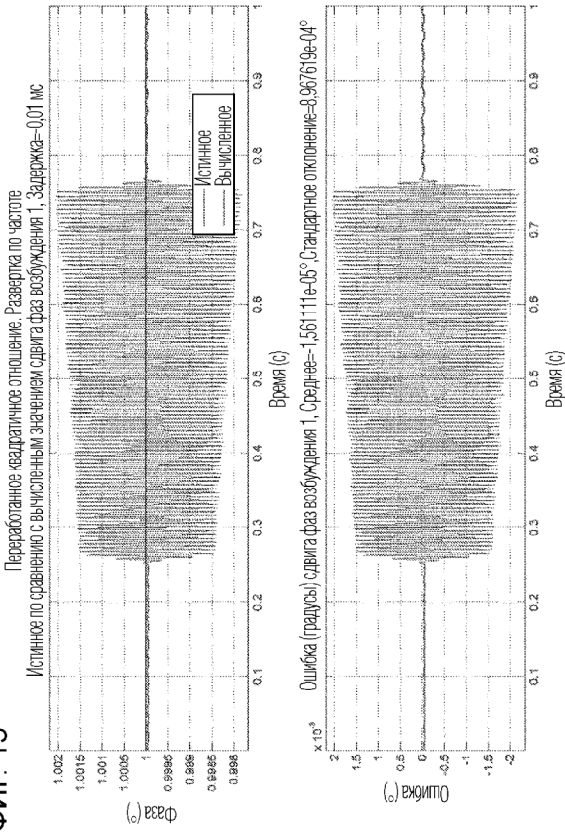
ФИГ. 13



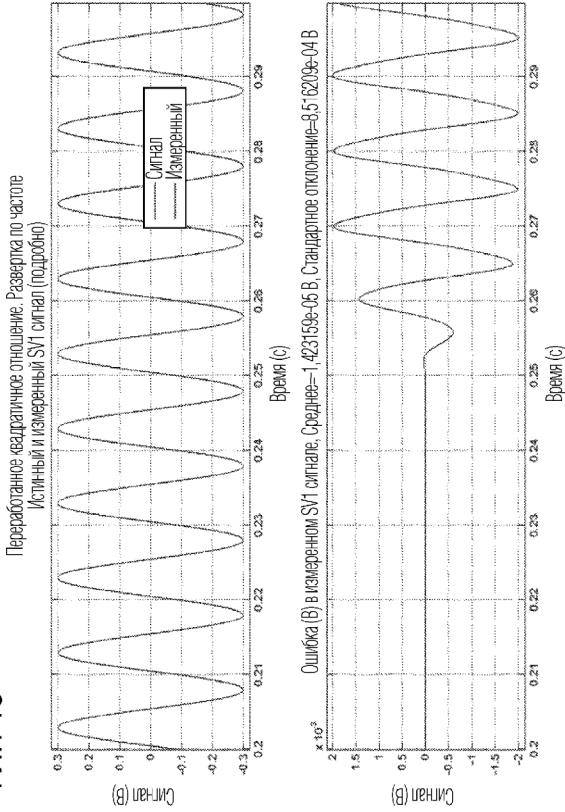
ФИГ. 14



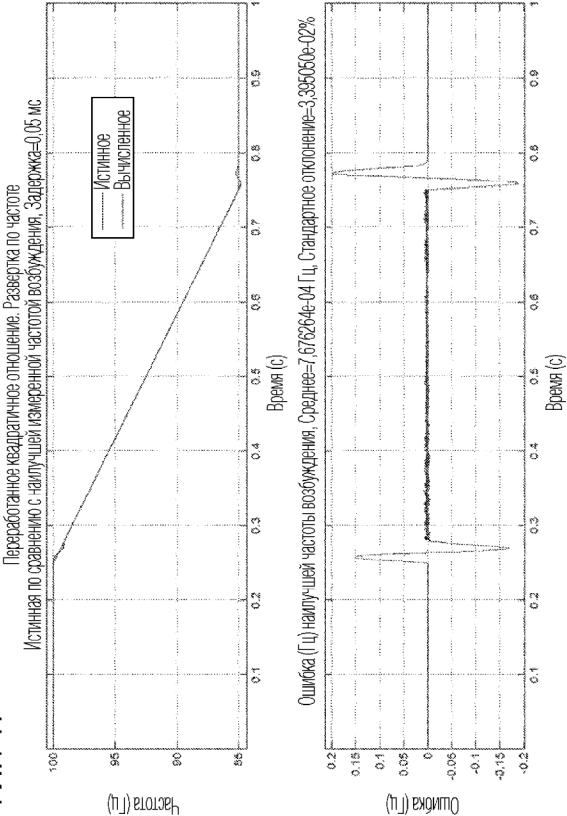
ФИГ. 15



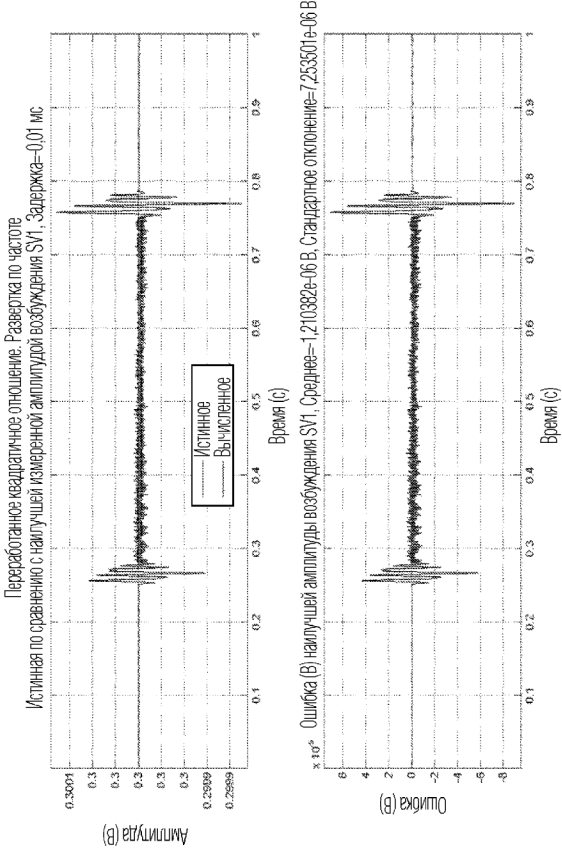
ФИГ. 16



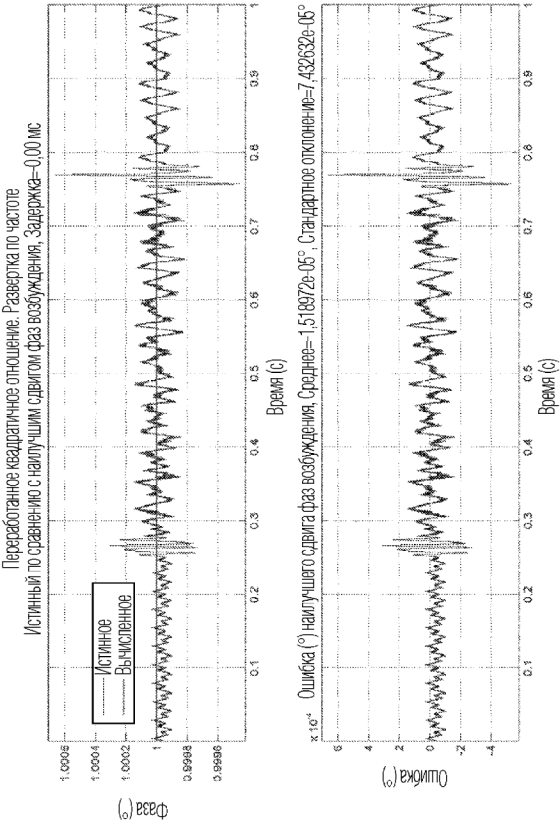
ФИГ. 17



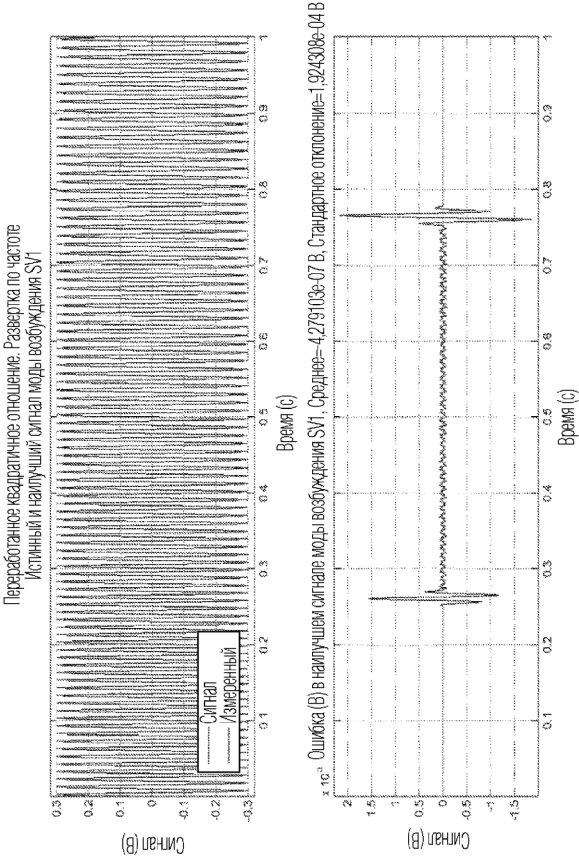
ФИГ. 18



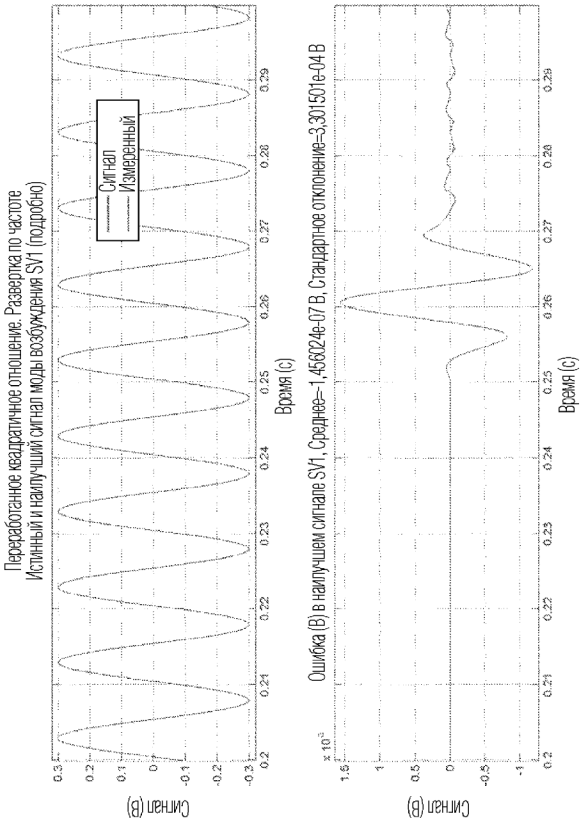
ФИГ. 19



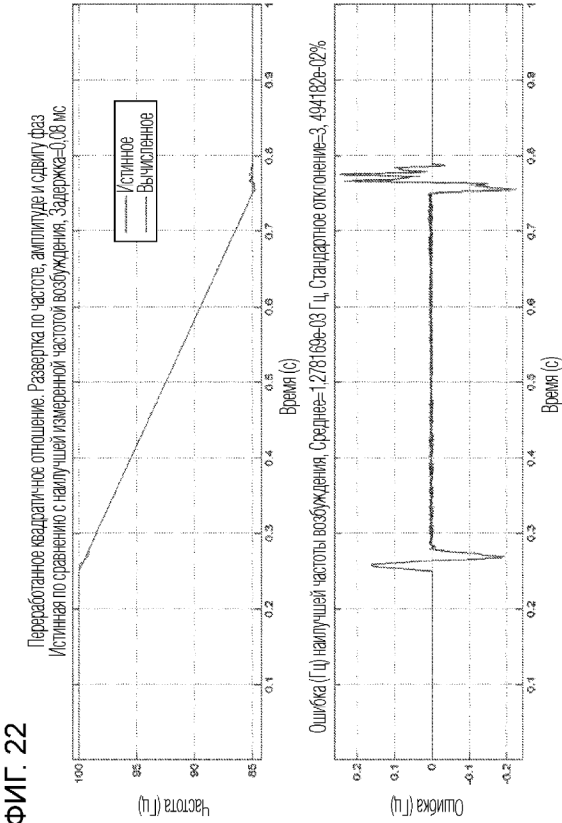
ФИГ. 20



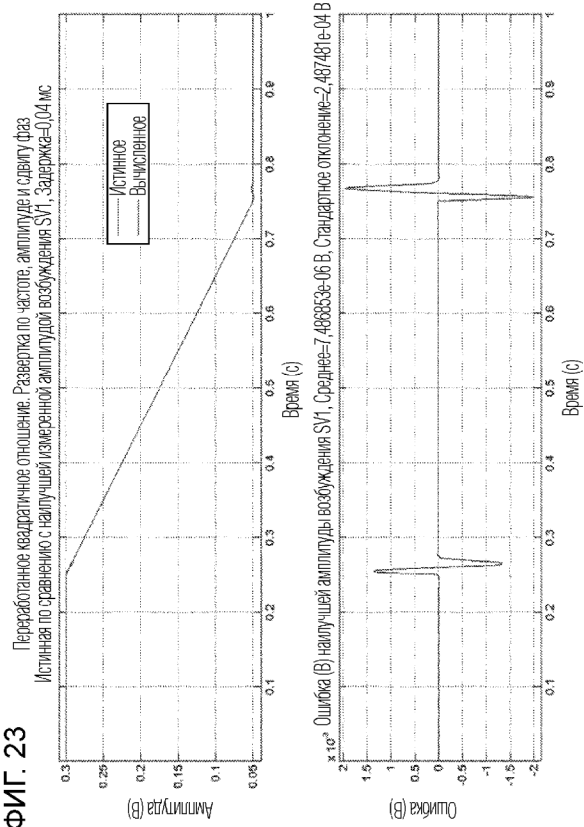
ФИГ. 21



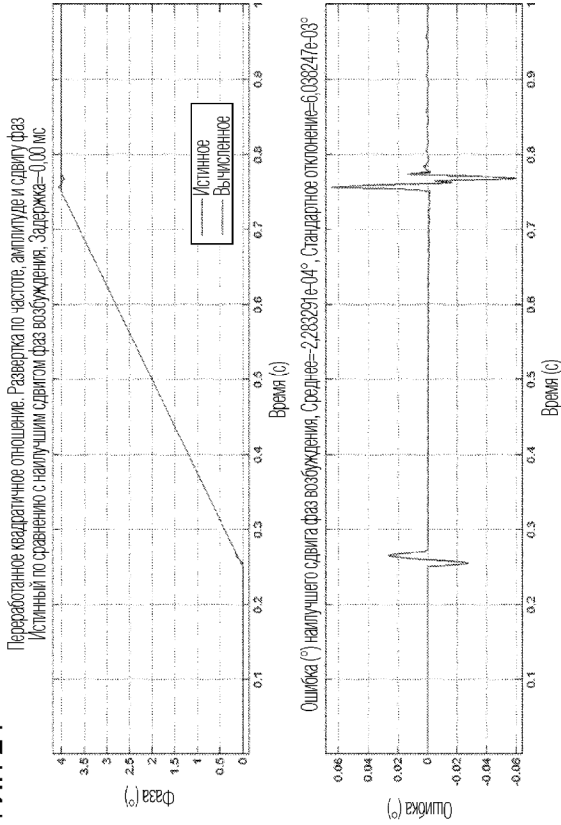
ФИГ. 22



ФИГ. 23

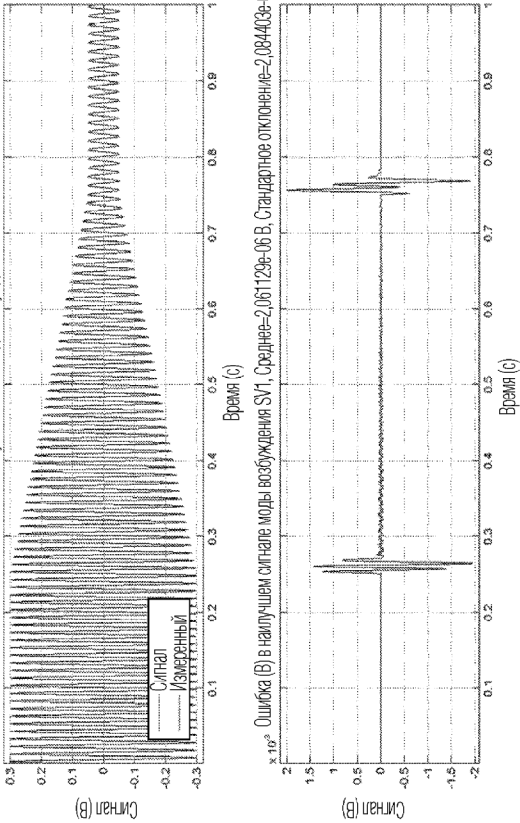


ФИГ. 24

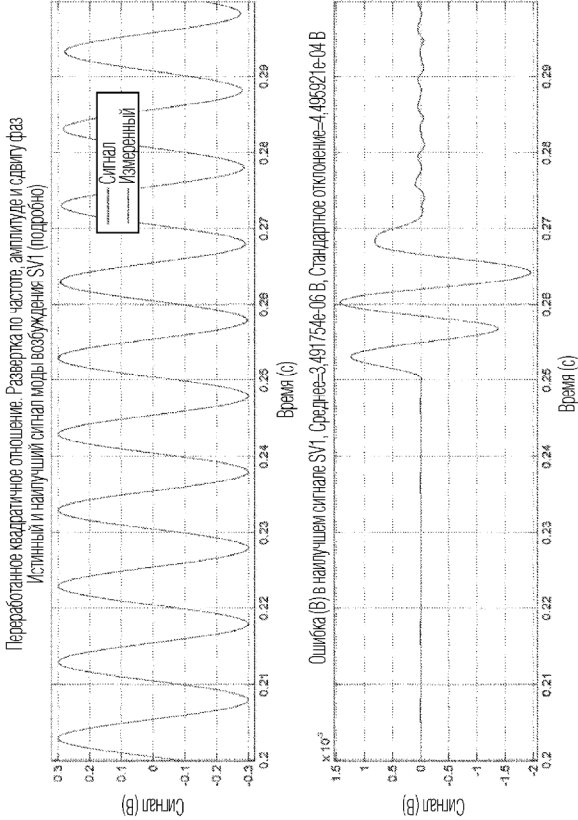


ФИГ. 25

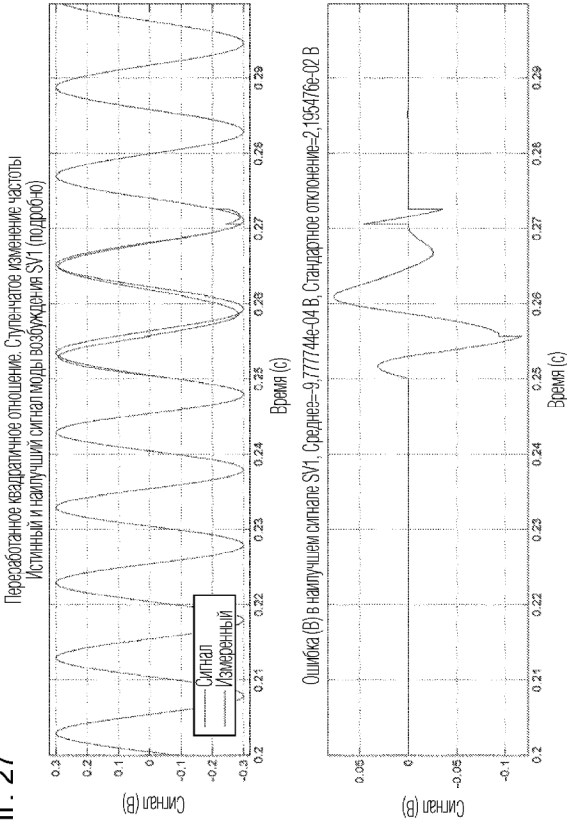
Переработанное квадратичное отношение. Развертка по частоте, амплитуде и сдвигу фаз
Истинный и налучший сигнал моды возбуждения SV1



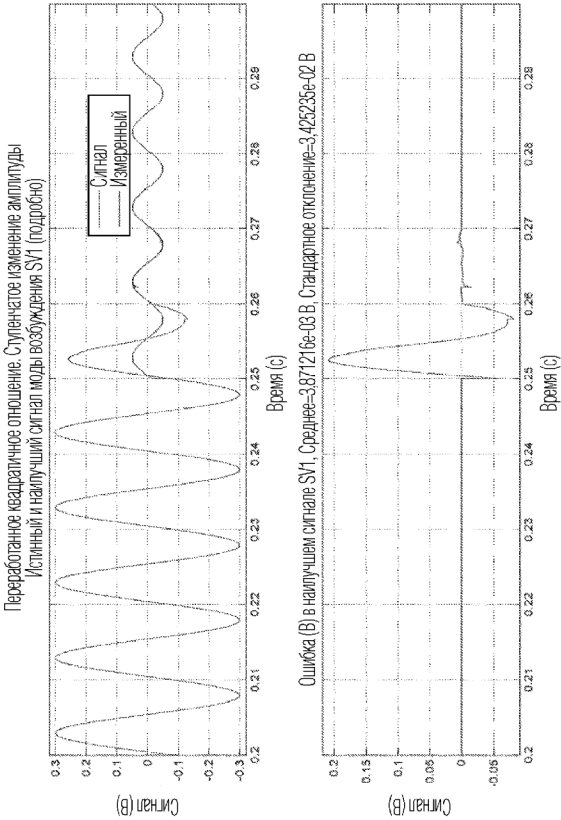
ФИГ. 26



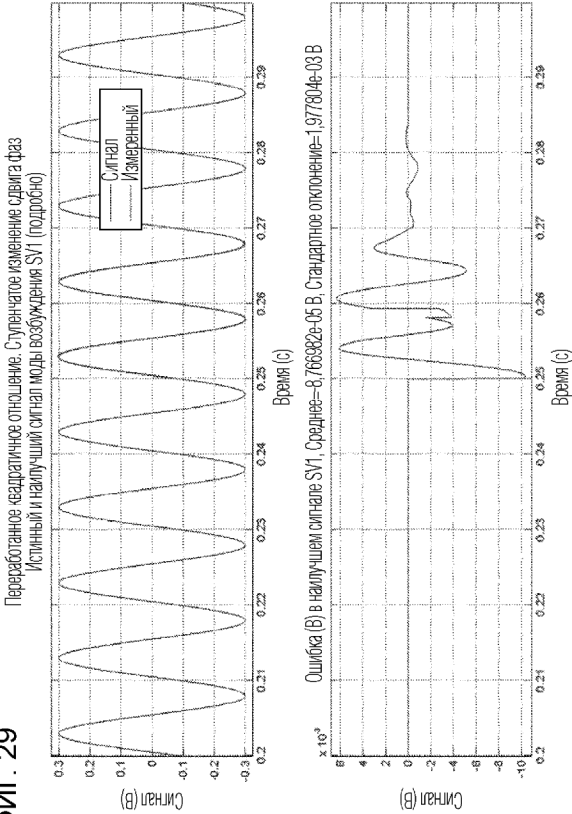
ФИГ. 27



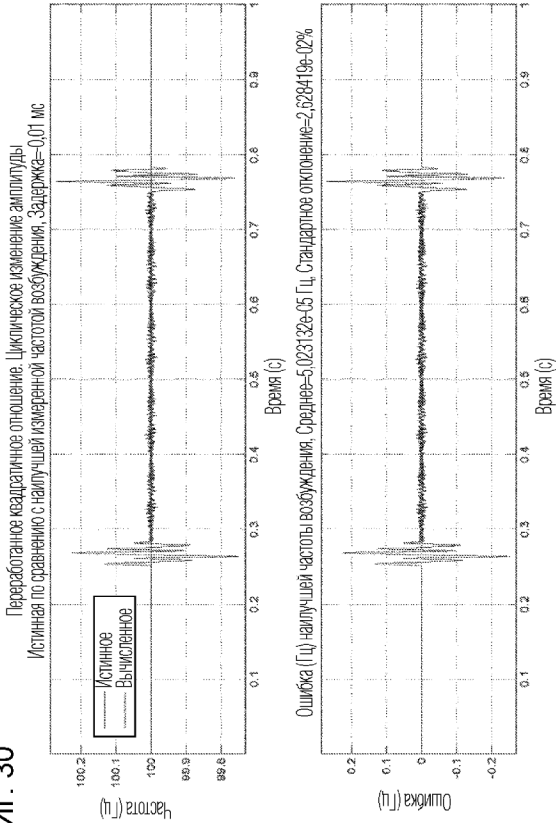
ФИГ. 28



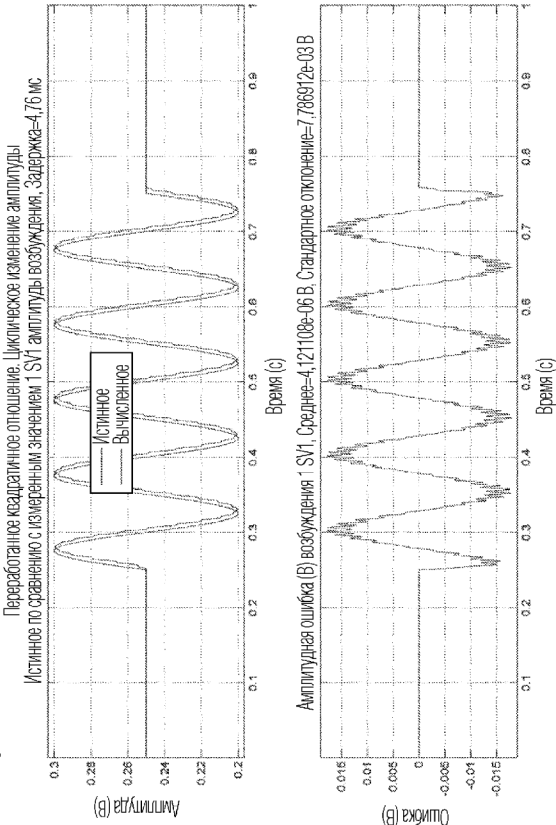
ФИГ. 29



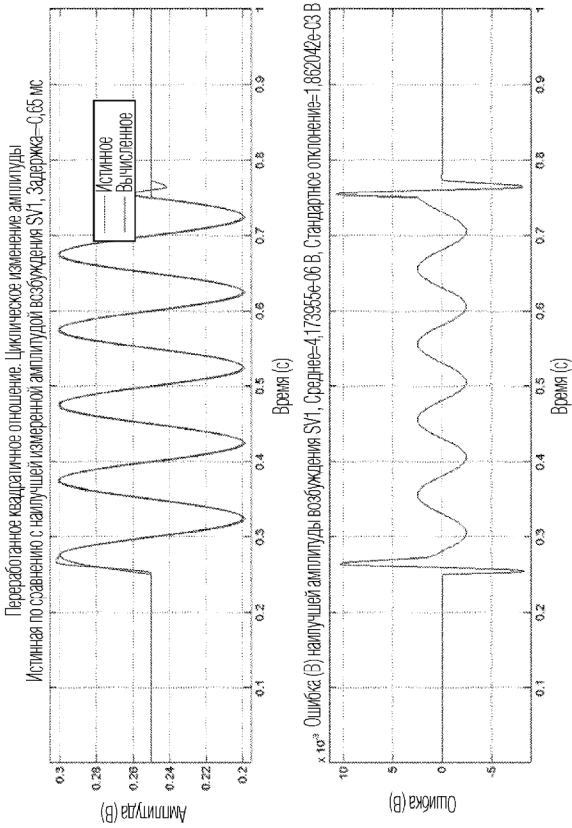
ФИГ. 30



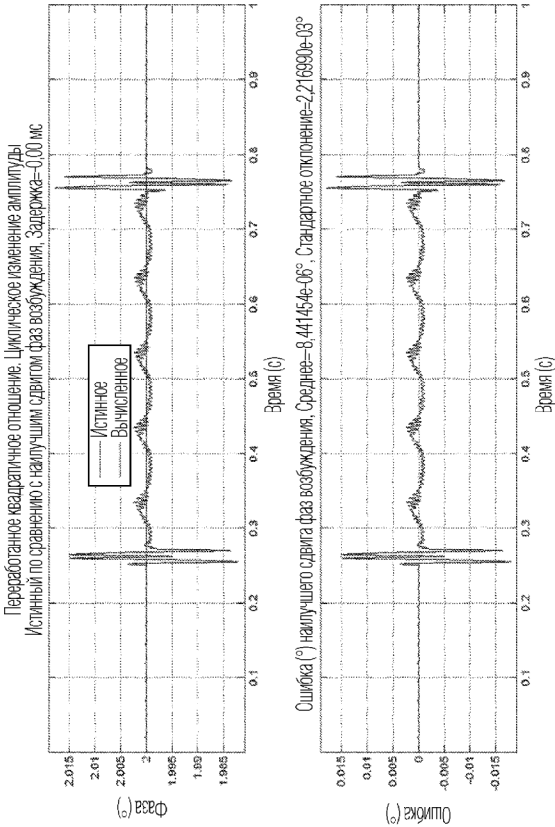
ФИГ. 31



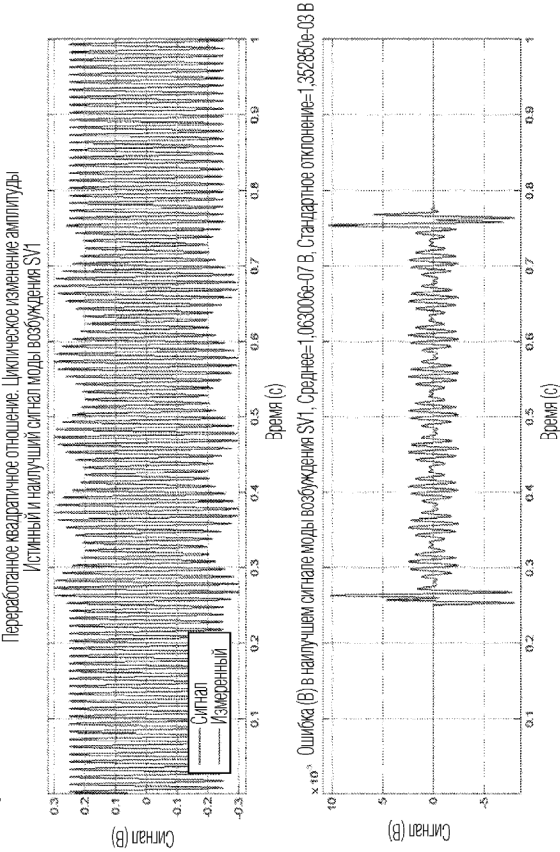
ФИГ. 32



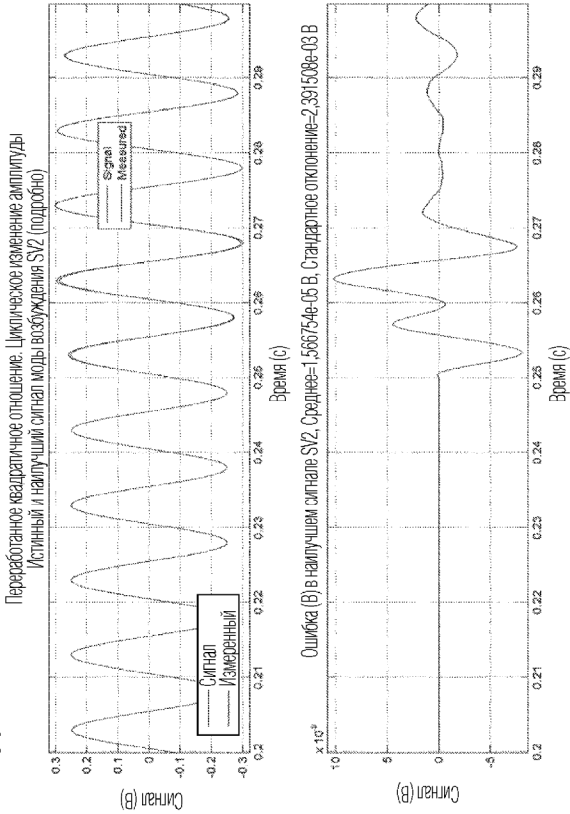
ФИГ. 33



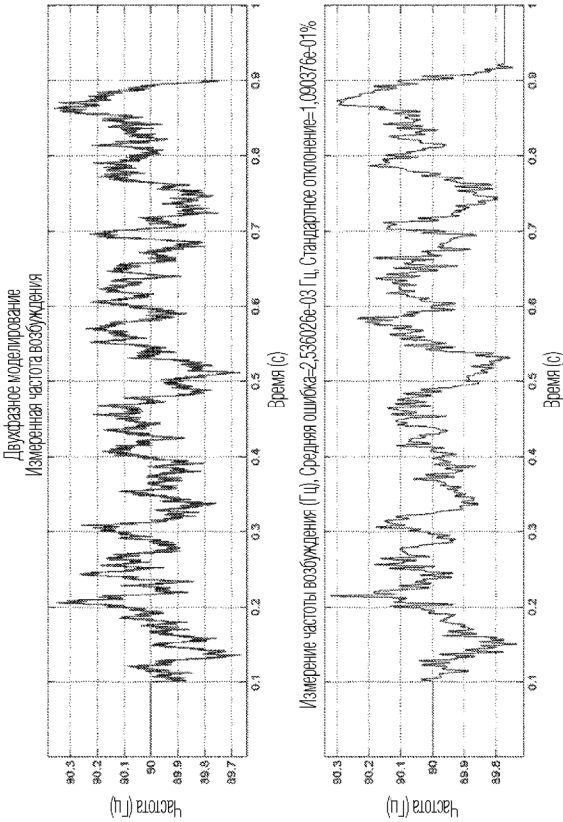
ФИГ. 34



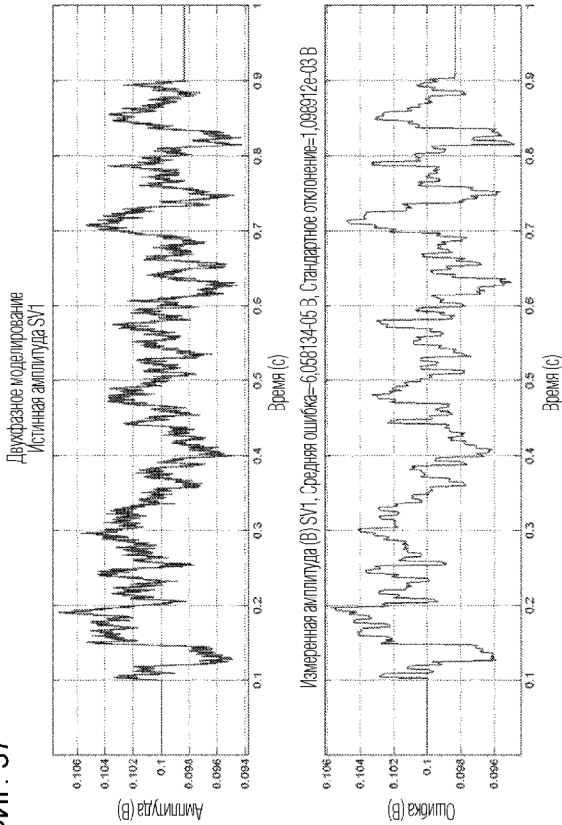
ФИГ. 35



ФИГ. 36



ФИГ. 37



ФИГ. 38

